

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# **“Estudio experimental de llamas de premezcla de DME en una celda Hele-Shaw”**

---

**CARLOS VIVANCO SILVA**

Tutor

**FERNANDO VEIGA LÓPEZ**

**LEGANÉS, 2018**



## RESUMEN

El presente trabajo final de grado analiza experimentalmente el comportamiento de llamas de premezcla en una geometría cuasi bidimensional. Para ello, se hace uso de una celda Hele-Shaw como cámara de combustión. Se presentan tres casos, en función de cómo estén dispuestas su entrada y su salida: cerrado-abierto, abierto-abierto y abierto-cerrado. En particular se estudiará un gas altamente inflamable y de reconocida aplicación como biocombustible, el Dimetiléter (DME). El principal objetivo, es la caracterización del proceso de combustión de este combustible modificando las condiciones de contorno.

Para llevar a cabo los ensayos experimentales se dispone de una instalación perteneciente al Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. Los principales elementos que la forman son: la celda Hele-Shaw, donde tiene lugar la reacción de combustión y la consecuente propagación de la llama; y la cámara de velocidad súper lenta “*Memrecam HX3*”, cuya función es capturar y digitalizar el fenómeno físico, permitiendo el posterior tratamiento de imagen con Matlab.

El proyecto se divide en tres partes principales: La primera, se basa en el análisis teórico de la combustión y del movimiento fluido dinámico de las llamas laminares de premezcla; la segunda parte presenta el experimento, y el uso del tratamiento de imagen como método de análisis; y por último, se analizan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

Para dicho estudio, se ha calculado la posición media de la llama y su velocidad de propagación en función de la relación combustible-aire. Se ha observado que dichos parámetros cambian mucho dependiendo de la configuración. Pudiendo observarse desde una llama muy rápida con forma de dedo en el caso cerrado-abierto, hasta una llama que oscila en el caso abierto-cerrado, en la cual se estudiará su frecuencia de oscilación. Para los tres casos analizados la velocidad de propagación tendrá su máximo entorno al dosado estequiométrico haciéndose cada vez más lenta a medida que la mezcla se empobrece o enriquece.

### **Palabras clave**

Celda Hele-Shaw; Dimetiléter (DME); Combustión; Tratamiento de imagen; Velocidad de propagación.



## ABSTRACT

The present dissertation experimentally analyses the behaviour of premixed flames in a quasi-bidimensional geometry. In order to do so, it makes use of a cell Hele-Shaw as combustion chamber. Three cases are presented, depending on how its inlet and outlet are arranged: closed-open, open-open and open-closed. A highly flammable gas, whose application as biofuel is very well-known, Dimethyl ether (DME), will be studied. The main objective of the study is to characterize the combustion process of this fuel by modifying the boundary conditions.

So as to undertake the experimental tests, an installation that belongs to the Department of Thermal and Fluid engineering of the university Carlos III of Madrid was used. The installation is comprised of the following main elements: the Hele-Shaw cell, where the combustion reaction and the consequent propagation of the flame take place and the super slow speed camera "Memrecam HX3", whose function is to capture and digitize the physical phenomenon, allowing the subsequent image treatment with Matlab.

The project is divided into three main parts: The first one is based on the theoretical analysis of combustion and the fluid dynamic movement of the laminar premixed flames. The second part presents the experiment in question, and the use of the image treatment as a method of analysis. Finally, the results obtained in the different tests are analyzed.

For this study, the mean position of the flame and its propagation speed according to the fuel-air ratio has been calculated. It has been observed that these parameters remarkably vary depending on the selected configuration. For instance, it has been possible to observe from a very quick finger-shaped flame in the closed-open case, to a flame that oscillates in the open-closed case, in which its frequency of oscillation will be studied. For the three analyzed cases, the propagation speed will have its maximum around stoichiometric dosing, becoming slower as the mixture becomes impoverished or enriched.

### **Keywords**

Hele-Shaw cell; Dimethyl ether (DME); Laminar premixed flames; Imagen treatment; Propagation speed.



## DEDICATORIA

Quiero dedicar en primer lugar este trabajo a Fernando, gracias a él he conseguido cogerle gustillo al laboratorio además de que ha conseguido que tome como mía su afición por las llamas.

En segundo lugar quiero agradecer a Víctor y a Ana haberme acompañado durante estos años de la carrera, sé que me llevo unos amigos para toda la vida.

A mi familia agradecerles el apoyo sobre todo en los momentos difíciles haciendo posible que hoy pueda acabar la carrera.

Por último no me olvido de mis amigos, a los de San Millán y los que aún no han reconocido que lo son. Muchas gracias a todos.





## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	17
1.1. Contexto histórico y motivación del proyecto.....	17
1.2. Objetivos. ....	17
1.3. Estructura del proyecto. ....	18
1.4. Impacto socioeconómico y medioambiental.....	19
1.5. Marco regulatorio. ....	21
2. ESTADO DEL ARTE .....	23
<b><u>PARTE I: ESTUDIO TEÓRICO DE LAS LLAMAS</u></b>	
<b>DE PREMEZCLA DE DME</b>	
3. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME.....	27
4. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME.....	35
5. ANÁLISIS FLUIDO DINÁMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME .....	41
6. ANÁLISIS DE LAS INESTABILIDADES DE LAS LLAMAS DEL DME .....	59
<b><u>PARTE II: PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA EL ANÁLISIS</u></b>	
<b>DE LAS LLAMAS DE PREMEZCLA DE DME</b>	
7. MONTAJE Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	65
8. TRATAMIENTO DE IMAGEN .....	77
<b><u>PARTE III: ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD Y DE LA FORMA DE LAS</u></b>	
<b>LLAMAS DE PREMEZCLA DE DME</b>	
9. RESULTADOS DEL ENSAYO.....	85
9.1. Caso cerrado abierto.....	85
9.2. Caso abierto-abierto.....	89
9.3. Caso abierto-cerrado.....	93
10. CONCLUSIONES .....	101
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A. CÓDIGO MÁTLAB.....</b>	<b>105</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Folleto prevención de riesgos laborales universidad Carlos III de Madrid	20
Figura 4.1.	Gráfica Temperatura adiabática de llama en función del dosado.....	36
Figura 5.1.	Llama de premezcla y de difusión.....	41
Figura 5.2.	Llama laminar y turbulenta.....	41
Figura 5.3.	Llama subsónica y supersónica.....	42
Figura 5.4.	Llama homogénea y heterogénea.....	43
Figura 5.5.	Frente de llama en movimiento.....	44
Figura 5.6.	Esquema del frente de llama estacionaria de una llama de premezcla 1D.....	47
Figura 5.7.	Esquema del espesor de la llama y relación entre la temperatura de la llama y la fracción másica del combustible.....	51
Figura 5.8.	Esquema de la llama para la zona reactiva.....	52
Figura 5.9.	Velocidad laminar teórica de la llama en función del dosado.....	54
Figura 6.1.	Inestabilidad de Darrieus-Landau (DL).....	57
Figura 6.2.	Mecanismo de formación de lóbulos en el frente de la llama.....	58
Figura 6.3.	Inestabilidad termo-difusiva.....	59
Figura 7.1.	Instalación del ensayo experimental.....	63
Figura 7.2.	Celda Hele-Shaw utilizada en el ensayo experimental.....	64
Figura 7.3.	Perspectiva isométrica y planta de la celda Hele-Shaw.....	64
Figura 7.4.	Explosionado de la cámara de combustión.....	65
Figura 7.5.	Bujía incandescente Bosch Duraspeed.....	66
Figura 7.6.	Cámara de velocidad súper lenta Memrecam HX3.....	67
Figura 7.7.	Tanque de almacenamiento y vista en detalle de las válvulas y manómetros de control de salida del DME .....	67
Figura 7.8.	Válvula de entrada del aire.....	68
Figura 7.9.	Controladores de flujo másico del DME y del aire.....	68
Figura 7.10.	Consola del software Smart Track 2, Setpoint dosado 1.3.....	69

Figura 7.11.	Mezclador de fluidos.....	70
Figura 7.12.	Válvula de seguridad, abierta a la izquierda y cerrada a la derecha.....	70
Figura 7.13.	Batería de coche Bosch S3-004.....	71
Figura 7.14.	Botón de encendido y temporizador.....	71
Figura 8.1.	Avance del frente de la llama de izquierda a derecha para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.....	75
Figura 8.2.	Avance del frente de la llama de izquierda a derecha para la configuración cerrado-abierto y dosado 1 tratado con un filtro de balance de blancos y negros.....	76
Figura 8.3.	División de la cámara de combustión en pixeles 1792x1072.....	77
Figura 8.4.	Perfil de la llama para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.....	77
Figura 8.5.	Gráficas x-y del perfil de la llama para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.....	78
Figura 8.6.	Área quemada en función del tiempo para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.....	78
Figura 8.7.	Velocidad de propagación de la llama en función del tiempo para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.....	79
Figura 9.1.1.	Llenado de la cámara configuración cerrado-abierto.....	83
Figura 9.1.2.	Ignición de la mezcla para la configuración cerrado-abierto.....	84
Figura 9.1.3.	Forma de la llama de los dosados presentados en el caso cerrado-abierto.....	84
Figura 9.1.4.	Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre $\Phi = 0.7$ de la configuración cerrado-abierto.....	85
Figura 9.1.5.	Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico $\Phi = 1.0$ de la configuración cerrado-abierto.....	85
Figura 9.1.6.	Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico $\Phi = 1.3$ de la configuración cerrado-abierto.....	86
Figura 9.1.7.	Velocidad de propagación de la llama en función del dosado para la configuración cerrado-abierto.....	87
Figura 9.2.1.	Llenado de la cámara configuración abierto-abierto.....	87
Figura 9.2.2.	Ignición de la mezcla para la configuración abierto-abierto.....	88

Figura 9.2.3. Forma de la llama de los dosados presentados en el caso abierto-abierto.....	88
Figura 9.2.4. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre $\Phi = 0.7$ de la configuración abierto-abierto.....	89
Figura 9.2.5. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico $\Phi = 1.0$ de la configuración abierto-abierto.....	89
Figura 9.2.6. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico $\Phi = 1.3$ de la configuración abierto-abierto.....	90
Figura 9.2.7. Velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para la configuración abierto-abierto.....	90
Figura 9.3.1. Llenado de la cámara configuración abierto-cerrado.....	91
Figura 9.3.2. Ignición de la mezcla para la configuración abierto-abierto.....	91
Figura 9.3.3. Forma de la llama de los dosados presentados en el caso abierto-cerrado.....	92
Figura 9.3.4. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre $\Phi = 0.7$ de la configuración abierto-cerrado.....	92
Figura 9.3.5. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 0.7.....	93
Figura 9.3.6. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico $\Phi = 1.0$ de la configuración abierto-cerrado.....	94
Figura 9.3.7. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 1.....	94
Figura 9.3.8. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico $\Phi = 1.3$ de la configuración abierto-cerrado.....	95
Figura 9.3.9. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 1.3.....	95
Figura 9.3.10. Velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para la configuración abierto-abierto.....	96
Figura 9.3.11. Frecuencia de oscilación predominante en función del dosado.....	96



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Propiedades físicas DME Y GLP.....	26
Tabla 3.2. Fracción másica de cada especie en el instante inicial en función del dosado.....	28
Tabla 3.3. Fracción másica de cada especie en el instante final en función del dosado.....	29
Tabla 3.4. Fracción molar de cada especie en el instante inicial en función del dosado.....	29
Tabla 3.5. Fracción molar de cada especie en el instante final en función del dosado....	30
Tabla 1.6. Masa molar de cada especie química.....	30
Tabla 3.7. Masa molar de la mezcla en el instante inicial en función del dosado.....	30
Tabla 3.8. Densidad de cada especie química.....	31
Tabla 3.9. Densidad de la mezcla en el instante inicial en función del dosado.....	31
Tabla 4.1. Constante específica de los gases de cada especie química.....	34
Tabla 4.2. Constante específica de la mezcla en el instante inicial en función del dosado.....	34
Tabla 5.1. Propiedades aire a 25°C y 1 atm y difusividad molecular del $O_2$ y del DME en el aire.....	41
Tabla 5.2. Número de Prandtl y números de Schmidt y Lewis en mezclas pobres y ricas.....	41
Tabla 7.1. Flujo másico del DME para los diferentes dosados.....	69
Tabla 7.2. Tiempo de llenado de la cámara de combustión en función del dosado.....	72
Tabla 7.3. Presupuesto del proyecto.....	73





## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Contexto histórico y motivación del proyecto.

El fuego, ha acompañado al ser humano a lo largo de la Historia, siendo objeto de atracción y admiración. No es difícil comprender esta divinización que ha surgido ante dicho fenómeno físico, gracias a sus beneficios, pero también a su gran capacidad de destrucción. Si hoy en día aún es complicado entenderlo y no admirarlo, pongamos en la piel de nuestros antepasados de Altamira (Cantabria), que sin ningún conocimiento previo ya se servían de su poder calorífico y lumínico para cocinar y ahuyentar a los animales más peligrosos [1], o en la de las primeras civilizaciones históricas quiénes encontraron en él sus primeros usos bélicos [2].

Sin embargo, a pesar de ser algo tan cotidiano, y haber sido objeto de estudio desde los griegos [3] hasta los físicos de la época moderna [4], no fue hasta mediados de los años 70 del siglo XX [5], cuando se produjo el mayor avance en la ciencia de la combustión, debido a la necesidad de mejorar la eficiencia en la producción energética. Esto se vio favorecido por el desarrollo de las técnicas de análisis matemático, la mejora de las técnicas experimentales y el surgimiento de las simulaciones computacionales.

Aprovechando los actuales conocimiento de la combustión, el presente estudio se ha visto motivado por el surgimiento de nuevas tecnologías como la robótica o el uso de drones, a fin de desarrollar en el futuro pequeños dispositivos de potencia que puedan ser implementados en estas tecnologías, aprovechando la ventaja de la gran densidad de energía que presentan los combustibles frente a las baterías electroquímicas. Además, el agotamiento del petróleo resalta la necesidad de investigar el comportamiento de los biocombustibles, capaces de producirse a partir de fuentes renovables como la biomasa [6].

### 1.2. Objetivos.

Con el fin de comprender la combustión en micro conductos el ensayo se centra en el análisis de las llamas de premezcla del Dimetiléter (DME), un biocombustible altamente inflamable, en una celda Hele-Shaw. Este tipo de celda permite el estudio cuasi

bidimensional de fluidos. En este caso, es utilizada como cámara de combustión. Atendiendo a las diferentes configuraciones que presenta la celda en función del estado de su entrada y salida, se tienen los siguientes casos: cerrado-abierto, abierto-abierto y abierto-cerrado.

Para la medición de la combustión en la celda se cuenta con una cámara de velocidad súper lenta “*Memrecam HX3*”, que permite la captura y digitalización del fenómeno físico.

De este modo, los objetivos del proyecto serán la caracterización del comportamiento del DME para las diferentes condiciones de contorno de la celda Hele-Shaw y el estudio del tratamiento de imagen como método de análisis de la propagación de las llamas.

### **1.3. Estructura del proyecto.**

El trabajo consta de tres partes principales. La primera, consiste en un análisis teórico de la combustión y se divide en cuatro secciones. En la primera sección, se presenta un análisis químico de la combustión del DME con el fin de comprender los cambios a nivel molecular de la reacción. En la segunda sección, se efectúa un análisis termodinámico del problema de estudio con el objetivo de conocer la máxima temperatura teórica que puede alcanzar la llama dentro de la celda. En la tercera sección, se realiza un análisis fluido dinámico, para ello, se describen los fenómenos de transporte involucrados en las reacciones de combustión y los tipos de llamas que existen, para terminar la sección con un análisis de las llamas de premezcla unidimensionales, con fin de obtener la velocidad teórica de propagación de la llama. En la última sección, se analiza teóricamente los tipos de inestabilidades que aparecen en nuestros ensayos experimentales.

La segunda parte, se compone de dos secciones. En la primera, se describen los elementos que forman parte del experimento y la metodología llevada a cabo en todos los ensayos. En la segunda, se explica el uso del tratamiento de imagen para la obtención de los resultados del estudio.

En la tercera y última parte, se muestran los resultados obtenidos en el experimento para cada configuración de estudio y las conclusiones efectuadas.

Adicionalmente, se proporciona un Anexo con el código que permite el procesamiento de los vídeos en Matlab.

#### **1.4. Impacto socioeconómico y medioambiental.**

El desarrollo e implementación de nuevas técnicas experimentales en las universidades provoca la creación de nuevos conocimientos que permiten a las empresas desarrollar y mejorar las nuevas tecnologías. Por este motivo, el análisis experimental efectuado en este proyecto busca el desarrollo del tratamiento de imagen como método experimental que permita entender mejor la propagación de las llamas en micro conductos con el fin de obtener una mayor eficiencia en las aplicaciones.

A día de hoy ya se conocen aplicaciones directas de micro cámaras de combustión en el campo de la robótica y de la exploración espacial así como drones como el de la empresa española Aerocamaras [7] que ha conseguido desarrollar un motor híbrido que otorga a estos aparatos mayor autonomía facilitando trabajos que necesitan varias horas de vuelo, como los rescates en alta mar.

Respecto al impacto medioambiental, vamos a centrarnos en el uso actual de los biocombustibles, para ello se van a plantear las ventajas y desventajas que suponen su utilización. En primer lugar se tiene que diferenciar entre los biocombustibles de primera generación procedentes directamente de los campos de cultivo de plantaciones tales como la caña de azúcar o la remolacha, y los de segunda generación cuyos vegetales no tienen función alimenticia y proceden de las innovaciones tecnológicas [6].

La principal ventaja de los biocombustibles es que pueden ser considerados cien por cien renovables en la medida de que tras su consumo pueden ser replantados. Por su parte, los biocombustibles de segunda generación además no suponen un problema en la reducción de zonas de cultivo, lo que evita los problemas alimenticios derivados de la explotación de las zonas agrarias destinadas al consumo de alimentos.


Por el contrario, cabe destacar la opinión de algunos científicos como Harmut Michel, premio Nobel de química en 1988, que cuestionan que estos sean una buena opción para combatir el cambio climático debido a la deforestación que promueven del Amazonas y el cambio de los usos del suelo, además de la gran cantidad de energía en forma de combustibles fósiles que se utilizan para la fabricación de fertilizantes que se emplean en

su producción, lo que sumado a sus inevitables emisiones de  $\text{CO}_2$  cuando combustionan no evitan la producción neta de este gas de efecto invernadero.

Respecto al Dimetiléter (DME), tal y como se presenta en la Sección 3, cabe destacar sus buenas condiciones en cuanto a impacto medioambiental se refiere, siendo un futuro candidato a remplazar al menos parcialmente el diésel en los motores de compresión.

### 1.5. Marco regulatorio.

Para llevar a cabo los experimentos se ha presentado al alumno los posibles riesgos que pueden acontecer en un laboratorio acorde con la legislación vigente, teniendo que firmar una declaración de responsabilidad en la que se le hace conocedor de los riesgos que pueden suponer el trabajo con materiales inflamables, así como cualquier elemento del laboratorio susceptible de ocasionar algún tipo de daño durante su uso. Se presenta a continuación en la Figura 1.1 un folleto de prevención de riesgos laborales de la universidad Carlos III de Madrid.



<b>EXPLOSIVO</b> Alejado de cualquier foco de ignición (calor, llamas, chispas), así como choques o fricciones.
<b>INFLAMABLE</b> Alejado de cualquier foco de ignición (calor, llamas, chispas).
<b>COMBURENTE</b> Evitar el contacto con materiales combustibles.
<b>TOXICIDAD AGUDA</b> Puede ser oral, cutánea o por inhalación. Usa campanas de extracción y Equipos de Protección Individual (EPI).
<b>CORROSIVO PARA METALES</b> Produce lesiones cutáneas o lesiones oculares graves, por lo que debes usar EPI.
<b>GASES A PRESIÓN</b> Alejado de cualquier foco de ignición (calor, llamas, chispas) y evita golpes o choques.
<b>TOXICIDAD AGUDA</b> Produce irritaciones cutáneas, oculares, de las vías respiratorias, sensibilizaciones: usa campanas de extracción y EPI.
<b>CANCERÍGENO, MUTÁGENO O TÓXICO PARA LA REPRODUCCIÓN</b> Usa campanas de extracción y EPI.
<b>PELIGROSO PARA EL MEDIO AMBIENTE</b> Gestiona los residuos correctamente. No los tires por los desagües.

**Seguridad general en laboratorios**

- Está prohibido fumar, comer o beber en el laboratorio.
- Hay que lavarse las manos después de cada práctica.
- Debemos mantener las zonas de trabajo ordenadas y limpias evitando dejar abrigos, bolsos, libros, etc.
- Si tienes cualquier problema de salud que te parezca relevante para la realización de una práctica debes informar al profesor antes de hacerla.
- Evita entrar con prendas sueltas o que cuelguen, así como con accesorios que puedan engancharse: pulseras, collares, etc.
- Sigue siempre las instrucciones del guión de prácticas.
- No puedes realizar experimentos ni tocar equipos que no estén autorizados por el profesor.

**Máquinas**

- No desactives los dispositivos de seguridad de una máquina, por ejemplo, los resguardos, ya que son las barreras materiales que garantizan tu protección.
- Utiliza correctamente la máquina siguiendo las instrucciones. En caso de duda, pregunta al profesor. No uses equipos si desconoces su funcionamiento.

**Riesgo eléctrico**

- El paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano puede producir quemaduras graves e incluso la muerte por asfixia o paro cardíaco.
- Si ves cables pelados o gastados, o los enchufes rotos, no los toques e informa inmediatamente al profesor.
- En las mesas de trabajo hay setas rojas de emergencias. En caso de necesidad pulsalas para cortar la corriente eléctrica.
- Si notas cosquilleos o el menor chispazo utilizando un equipo eléctrico o si los equipos se calientan de forma anormal, debes desconectarlos inmediatamente y comunicarlo al profesor.
- Cuando se haga un montaje o desmontaje las fuentes han de estar desconectadas y con el regulador a cero, es decir, sin tensión.

**Usos de productos químicos**

- La utilización de productos químicos puede ser peligrosa ya que pueden producir quemaduras, intoxicaciones agudas o crónicas, incendios, explosiones, etc.
- Si se produce un derrame pregunta al profesor cómo tienes que actuar.
- Si te salpica un producto químico a los ojos o la cara, lávate inmediatamente con abundante agua fría y acude siempre al médico. Utiliza el lavaojos y las duchas si es necesario.
- Los agentes químicos tienen distintas vías de entrada al organismo, siendo las más importantes:

**INHALACIÓN (RESPIRACIÓN)**

- No huelas los productos químicos.
- Siempre que sea posible trabaja en campanas de extracción de gases, no metiendo la cabeza dentro.
- Si es necesario usa mascarillas de protección.

**DIGESTIVA (COMER O BEBER)**

- No ingieras productos químicos.
- No pipetees.

**DÉRMICA: SALPICADURAS A PIEL Y OJOS**

- Al realizar trasvases utiliza embudos y haz las operaciones lentamente.
- Si mezclas ácido y agua tienes que hacerlo en este orden: ácido sobre agua (para evitar reacciones peligrosas).
- No remuevas ácidos con objetos metálicos.
- No calientes recipientes que estén cerrados.

**PARENTERAL (HERIDAS O PINCHAZOS)**

- Si tienes alguna herida, cúbrela con gasas o apósitos evitando su infección.

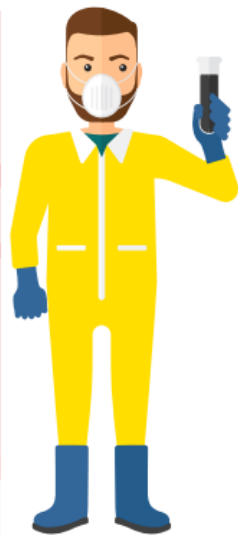


Figura 1.1. Folleto prevención de riesgos laborales universidad Carlos III de Madrid



## 2. ESTADO DEL ARTE

El estudio de llamas de premezcla en las celdas Hele-Shaw no ha sido un elemento de abundante estudio, solo teniendo la referencia de Paul D. Ronney [8], profesor de la universidad del Sur de California quien se ha dedicado vagamente al estudio de las configuraciones del presente estudio.

Por el contrario, el uso del tratamiento de imagen como técnica de análisis experimental recoge una amplia bibliografía especialmente en el biomedicina para la medición de biomoléculas o resonancias electromagnéticas [9], y la astrofísica para la medición de objetivos en el espacio [10].

En cuanto al DME, ha sido objeto [11][11] debido a su potencial uso como biocombustible.





**PARTE I:**

**ESTUDIO TEÓRICO  
DE LAS LLAMAS  
DE PREMEZCLA DE DME**



### 3. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME

Una reacción química es una transformación molecular de unas sustancias llamadas reactivos en otras denominadas productos, con el consecuente consumo o producción de energía. Como pone de manifiesto Kenneth K. Kuo [16] una reacción química arbitraria se puede escribir de la siguiente manera,



Siendo,  $v_i'$  el coeficiente estequiométrico del reactivo  $i$ ,  $v_j''$  el coeficiente estequiométrico del producto  $j$ ,  $M_i$  el símbolo químico del reactivo  $i$ , y  $M_j$  el símbolo químico del producto  $j$ .

Si se establece una reacción química en la que intervienen dos reactivos para formar dos productos, se puede escribir la siguiente ecuación general,



Donde los coeficientes estequiométricos ( $a, b, c, d$ ) indican la proporción de cada especie involucrada. Se puede considerar como el número de moléculas, átomos, iones o moles, y sus valores tienen que respetar la ley de conservación de la masa.

En el caso de la combustión se tiene una reacción de oxidación exotérmica, en la que un combustible reacciona con el oxígeno generando  $CO_2$ ,  $H_2O$  y una gran cantidad de energía. Esta energía se encuentra almacenada en los enlaces químicos del combustible que al romperse liberan más energía de la necesaria para formar los enlaces de los productos.

Para el análisis se ha escogido como combustible el Dimetiléter (DME), cuya fórmula química es  $C_2H_6O$  o en su forma extendida  $CH_3 - O - CH_3$ . Se trata de un gas incoloro

e inodoro a temperatura y presión ambiente, cuya llama tiende a tener un color azulado. El DME se utiliza actualmente en la industria petroquímica, sin embargo, está tomando una importante relevancia como posible biocombustible [12], gracias a que no es ni corrosivo, ni tóxico, ni mutágeno, ni contribuye al efecto invernadero, ni produce ozono. Además, debido a que contiene oxígeno en su estructura molecular y no tiene ligaduras entre átomos de carbono no origina humos, reduciendo considerablemente las emisiones de partículas. Un control en la inyección para tener una mezcla homogénea junto a su baja temperatura de autoignición, reduce las emisiones de  $NO_x$  resolviendo los principales problemas de los motores de encendido por compresión que usan el Diésel como combustible. El DME puede fabricarse a partir de materias primas bastante abundantes y variadas, como es el metanol que a su vez puede obtenerse a partir de residuos orgánicos o biomasa.

En la Tabla 3.1 se establece una recopilación de algunas propiedades de nuestro combustible comparadas con el propano y el butano. En ella podemos apreciar claramente su gran capacidad auto detonante, produciéndose la autoignición entre 235-350 °C, por lo que no necesitará un gran aporte de energía para la activación de la reacción.

**Tabla 3.1** Propiedades físicas DME Y GLP

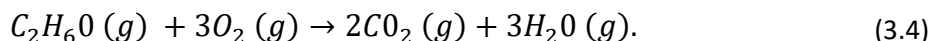
Propiedades	DME	Propano	Butano
Punto de ebullición [°C]	-24.9	-42.1	-0.5
Presión de vapor a 20°C [bar]	5.1	8.4	2.1
Densidad líquido a 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	668	501	610
Densidad del gas relativa al aire [-]	1.59	1.52	2.01
Poder calorífico inferior [kJ/kg]	28.430	46.360	45.740
Temperatura de autoignición a 1 atm [°C]	235-350	470	365

□

En general, las reacciones de combustión se deben al oxígeno disuelto en el aire. Para cálculos prácticos, se considera que el aire tiene un 21%  $O_2$  y un 79 % de  $N_2$  en términos de concentración molar. Implica que por cada mol de oxígeno hay 3.76 moles de nitrógeno. Esta relación como establece Chung K.Law [13], se puede expresar como,

$$Aire = 0.21O_2 + 0.79N_2 \quad \text{ó} \quad 4.76Aire = O_2 + 3.76N_2. \quad (3.3)$$

A continuación, se muestra la reacción estequiométrica de la combustión del DME,



Esta ecuación es la reacción principal dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, las reacciones químicas no se reducen en un solo paso, sino que realmente se tienen decenas de reacciones secundarias que no se van a tener en cuenta en este análisis, por salirse de los objetivos del trabajo.

Para poder medir la relación de concentración de combustible-oxidante, se define un parámetro conocido como dosado relativo  $\Phi$ . Este parámetro establece la relación entre la concentración de combustible-oxidante en la combustión de estudio ( $C/O$ ), y la relación de concentración de combustible-oxidante en la combustión estequiométricamente perfecta  $(C/O)_{st}$ . Según Chung K.Law se puede expresar como [5],

$$\Phi = \frac{(C/O)}{(C/O)_{st}}. \quad (3.5)$$

Cuando  $\Phi < 1$ , se tiene una mezcla pobre al tener menos combustible en comparación a la mezcla estequiometria. Por el contrario, si  $\Phi > 1$  se tiene una mezcla rica. En este trabajo se analizarán para la mayoría de los casos dosados relativos entre 0.7 y 1.4.

Este parámetro es muy importante a la hora de estudiar ciertas características del combustible como son: la temperatura adiabática de la llama, su velocidad de propagación o los límites de inflamabilidad.

Los límites de inflamabilidad, son los dosados extremos a partir de los cuales la reacción de combustión no tiene lugar. Se tiene siempre un límite para los dosados ricos y otro para los pobres y depende tanto del combustible como de las condiciones de la cámara. En el actual análisis estaremos en todos los casos dentro de los límites, por lo que siempre se llevará a cabo la combustión

Para poder caracterizar la combustión dentro de la cámara se considera que el sistema está formado por una mezcla de gases. Debido a la discontinuidad másica que presentan los medios gaseosos es necesario definir el concepto de partícula fluida. Una partícula fluida [14] es una masa elemental lo suficientemente grande como para contener un gran número de moléculas, y lo suficientemente pequeña como para considerar que en su interior no hay variaciones de las propiedades macroscópicas del fluido. Esta definición permite determinar una serie de propiedades que caracterizan cada mezcla.

Se define la fracción másica [15] como la cantidad de masa de la especie  $i$ , respecto a la masa total de la mezcla en el instante  $t$ ,

$$Y_i(\vec{x}, t) = \lim_{\partial V \rightarrow 0} \frac{n_i w_i}{\sum_{i=1}^M n_i w_i}. \quad (3.6)$$

Siendo  $n_i$ , el número de moles de la especie  $i$ ,  $w_i$  la masa molar de la especie  $i$ , y  $\partial V$  el volumen de la partícula fluida.

La suma total de las fracciones másicas es igual a la unidad,

$$\sum_{i=1}^M Y_i(\vec{x}, t) = 1. \quad (3.7)$$

En las Tablas 3.2 y 3.3 se presenta la fracción másica de cada especie en la mezcla inicial y final para cada dosado de estudio.

**Tabla 3.2** Fracción másica de cada especie en el instante inicial en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<i>Fracción másica</i>								
O <sub>2</sub>	0.216	0.214	0.212	0.21	0.208	0.206	0.203	0.202
N <sub>2</sub>	0.711	0.704	0.697	0.69	0.683	0.676	0.67	0.663
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0.073	0.082	0.091	0.100	0.109	0.118	0.127	0.135

**Tabla 3.3.** Fracción másica de cada especie en el instante final en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Fracción másica</b>								
O <sub>2</sub>	0.065	0.043	0.021	-	-	-	-	-
N <sub>2</sub>	0.711	0.704	0.697	0.69	0.683	0.676	0.67	0.663
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	-	-	-	-	0.01	0.02	0.029	0.039
CO <sub>2</sub>	0.139	0.157	0.175	0.192	0.19	0.188	0.186	0.185
H <sub>2</sub> O	0.085	0.096	0.107	0.118	0.117	0.116	0.115	0.113

Se define la fracción molar [15] como la proporción de moles de la especie  $i$ , respecto al número de moles totales que forman la mezcla en el instante  $t$ ,

$$X_i(\vec{x}, t) = \lim_{\partial V \rightarrow 0} \frac{n_i}{\sum_{i=1}^M n_i}. \quad (3.8)$$

Siendo  $n_i$ , el número de moles de la especie  $i$ , y  $\partial V$  el volumen de la partícula fluida.

Y de la misma manera, la suma de todas las fracciones molares será igual a la unidad,

$$X(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^M X_i(\vec{x}, t) = 1. \quad (3.9)$$

En las Tablas 3.4 y 3.5 se muestra la fracción molar de cada especie en el instante inicial y final, en función del dosado.

**Tabla 3.4.** Fracción molar de cada especie en el instante inicial en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Fracción molar</b>								
O <sub>2</sub>	0.2	0.199	0.198	0.196	0.195	0.194	0.193	0.191
N <sub>2</sub>	0.753	0.748	0.743	0.738	0.733	0.729	0.724	0.719
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0.047	0.053	0.059	0.066	0.072	0.077	0.083	0.09

**Tabla 3.5.** Fracción molar de cada especie en el instante final en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Fracción molar</b>								
O <sub>2</sub>	0.057	0.038	0.019	-	-	-	-	-
N <sub>2</sub>	0.719	0.71	0.701	0.693	0.689	0.685	0.68	0.676
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	-	-	-	-	0.006	0.012	0.018	0.024
CO <sub>2</sub>	0.09	0.101	0.112	0.123	0.122	0.121	0.121	0.12
H <sub>2</sub> O	0.134	0.151	0.168	0.184	0.183	0.182	0.181	0.18

Se define la masa molar de cada especie química  $M_i$ , como la cantidad de masa de la especie por unidad de cantidad de sustancia, es decir, por unidad de moles. Se calcula a partir del peso atómico de los elementos que forman cada molécula.

En la Tabla 3.6 se indica la masa molar de las especies químicas presentes en la reacción.

**Tabla 3.6.** Masa molar de cada especie química

	<b>Especie química</b>				
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<b>Masa molar</b>					
<b>[g/mol]</b>	32	28	46	44	18

La masa molar de la mezcla puede calcularse como [15],

$$M_m = \sum_{i=1}^M M_i X_i. \quad (3.10)$$

En las Tabla 3.7 expresa la masa molar de la mezcla inicial en función del dosado.

**Tabla 3.7.** Masa molar de la mezcla en el instante inicial en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Masa molar</b>								
<b>[g/mol]</b>	29.64	29.75	29.85	29.96	30.06	30.16	30.27	30.37



La densidad de cada sustancia [15] es la cantidad de masa que hay en una partícula fluida de la especie  $i$ , entre el volumen de la partícula fluida.

$$\rho_i(\vec{x}, t) = \lim_{\partial V \rightarrow 0} \frac{n_i w_i}{\partial V}. \quad (3.11)$$

Siendo,  $n_i$  número de moléculas,  $w_i$  masa de cada molécula y  $\partial V$  volumen de la partícula fluida.

En la Tabla 3.8 se muestra la densidad media de cada especie en estado gaseoso.

**Tabla 3.8.** Densidad de cada especie química

	<i>Especie química</i>				
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<i>Densidad</i>					
[Kg/m <sup>3</sup> ]	1.429	1.25	2.11	1.842	0.6

[]

La densidad total de la mezcla se calcula como,

$$\rho(\vec{x}, t) = \lim_{\partial V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^M n_i w_i}{\partial V}. \quad (3.12)$$

En la Tabla 3.9 se presenta la densidad de la mezcla inicial en condiciones ambientales, es decir, a 25 °C y 1 atm.

**Tabla 3.9.** Densidad de la mezcla en el instante inicial en función del dosado.

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<i>Densidad</i>								
[Kg/m <sup>3</sup> ]	1.325	1.33	1.335	1.34	1.345	1.35	1.355	1.36

Se comprueba como la masa molecular y la densidad de la mezcla son casi constante para los diferentes dosados, y muy parecidas a la masa molecular y la densidad del nitrógeno, esto se debe a la gran proporción de  $N_2$  que presenta la mezcla, lo que permitirá en los próximos análisis suponer que la mezcla está formada solo por aire.

#### 4. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME

Para que se produzca una reacción química tiene que haber un intercambio energético. Es por esta razón, que es necesario un análisis termodinámico de las reacciones, siendo tan importante este estudio que se puede hablar de una disciplina propia dentro de la termodinámica conocida como termodinámica química o termoquímica. Para comenzar el análisis termodinámico se define que es un sistema termodinámico y que tipo de sistema presenta el análisis experimental de estudio.

Un sistema termodinámico, es una parte del universo que se aísla para su estudio energético. Todo aquello que no pertenezca al sistema se denomina entorno; los límites del sistema se conocen como fronteras.

Atendiendo a estas definiciones, el sistema que se presenta estará delimitado por la celda donde se produce la combustión con todos sus componentes en estado gaseoso. Durante la reacción de combustión el sistema intercambiará calor y masa con el exterior, por lo que el sistema es abierto y homogéneo.

Para poder caracterizar el estado termodinámico de la reacción, es necesario definir una serie de funciones termodinámicas. Dado que se tiene una mezcla de gases, se definen estas propiedades para una mezcla de gases ideales. La ecuación de estado para cada especie química viene dada por la expresión,

$$PV = nRT. \quad (4.1)$$

Siendo,  $P$  la presión,  $V$  el volumen,  $n$  el número de moles,  $R$  la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura.

La constante específica de cada gas se puede formular como,

$$R_g = \frac{R}{M_g}. \quad (4.2)$$

En la Tabla 4.1 se muestra la constante específica de los gases de cada especie involucrada en la reacción.

**Tabla 4.1** Constante específica de los gases de cada especie química

	<i>Especie química</i>				
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<i>Constante específica de los gases</i>					
<i>[J/Kg * K]</i>	259.71	296.94	180.67	188.96	461.91

[]

Lo que permite, expresar la ecuación de estado de la siguiente manera,

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{nM_g R_g T}{V} = \rho R_g T. \quad (4.3)$$

A partir de la función de estado de un gas ideal se puede establecer la función de estado para una mezcla de gases. Para ello, se obtiene la constante específica de la mezcla, utilizando la relación (3.6) en la que se tiene en cuenta las proporciones de cada especie  $i$  [16]

$$R_m = \frac{R}{M_m} = R \sum_{i=1}^M \frac{Y_i}{M_i}. \quad (4.4)$$

En las Tablas 4.2 se calcula la constante específica de la mezcla en el instante inicial.

**Tabla 4.2** Constante específica de la mezcla en el instante inicial en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<i>Constante específica de los gases</i>								
<i>[J/Kg * K]</i>	281	280	279	277	276.5	276	275	274

La constante específica de la mezcla es casi la misma para los diferentes dosados, y muy parecida a la del nitrógeno, esto se debe a la gran proporción de  $N_2$  que hay en la mezcla.

Para calcular la presión total que ejercen los gases en un sistema cerrado se tiene en cuenta la ley de las presiones parciales de Dalton [25] que establece que “la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de cada especie  $i$ ”.

$$P = \sum_{i=1}^M P_i = \sum_{i=1}^M \rho_i R_{gi} T = \rho T R \sum_{i=1}^M \frac{Y_i}{M_i} = \rho R_m T. \quad (4.5)$$

Como la cámara de combustión está abierta siempre por algún lado, la presión de la cámara se igualará siempre a la atmosférica y permanecerá prácticamente constante.

La entalpía específica es una función de estado, cuya variación representa la energía puesta en juego en un sistema a presión constante. Se define como [17],

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p(T) dT. \quad (4.6)$$

Donde  $h_0$  es la entalpía específica del gas a una temperatura de referencia  $T_0$  y  $c_p$  el calor específico a presión constante, el cual depende de la temperatura.

La entalpía de la mezcla es la suma de las entalpías de cada especie  $i$  multiplicadas por su fracción másica [27],

$$h = \sum_{i=1}^M h_i Y_i. \quad (4.7)$$

$$h_i = h_{0i} + \int_{T_0}^T c_{p_i}(T) dT. \quad (4.8)$$

$$h = \sum_{i=1}^M \left( h_{0_i} Y_i + Y_i \int_{T_0}^T c_{p_i}(T) dT \right). \quad (4.9)$$

Se define la temperatura adiabática de la llama, como la temperatura máxima teórica alcanzada por la mezcla si la reacción se produjese sin ningún tipo de pérdidas energéticas. Para definirla, partimos de la Primera Ley de la Termodinámica [28] para un sistema cerrado, que puede ser enunciada como, “*el calor intercambiado por un sistema con su entorno será igual a la variación de la energía interna del sistema más el trabajo intercambiado entre el sistema y el entorno*”.

$$dq = du + p dv. \quad (4.10)$$

Si se establece que la combustión transcurre adiabáticamente, y a presión y volumen constantes, entonces el calor intercambiado en la reacción es igual a la variación de entalpía del estado inicial y final, e igual a cero [18],

$$q = h_p - h_r = 0. \quad (4.11)$$

$$\sum_{salida} n_i H_i - \sum_{entrada} n_i H_i = 0. \quad (4.12)$$

$$\sum_{salida} n_i H_i(T_{ad}) = -n_f H_{i_c}^{\circ} + \sum_{entrada} n_i H_i(T_0) = 0. \quad (4.13)$$

Siendo,  $n_i$  el número de moles de cada especie,  $H_i(T_{ad})$  la entalpía de los productos a la temperatura adiabática,  $H_i(T_0)$  la entalpía de los reactivos a la temperatura de referencia (298.15K),  $n_f$  el número de moles del combustible y  $H_{i_c}^{\circ}$  la entalpía de la combustión.

Figura 4.1 se representa gráficamente la temperatura adiabática de la llama en función del dosado.

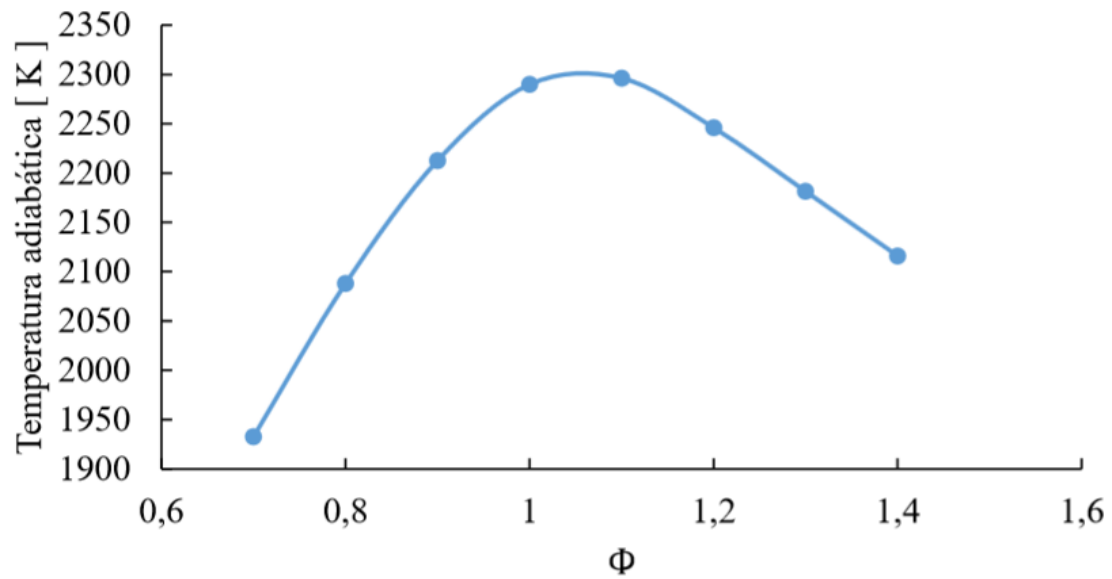


Figura 4.1. Gráfica Temperatura adiabática de llama en función del dosado.





## 5. ANÁLISIS FLUIDO DINÁMICO DE LA COMBUSTIÓN DEL DME

Cuando en un medio fluido existen gradientes de energía, concentración o cantidad de movimiento, el sistema restablece el equilibrio transportando las moléculas a la región del sistema donde se produce la deficiencia. Esto se conoce como fenómeno de transporte.

Los fenómenos de transporte son complejos de estudiar, ya que en ellos intervienen muchas variables a veces difíciles de cuantificar. Los principales fenómenos de transporte son el de la energía, el de la materia y el de la cantidad de movimiento.

La Ley de Fourier [19] establece la ley de transporte de la energía. En ella se indica que *“el flujo energético entre dos cuerpos es proporcional al gradiente de temperaturas entre ambos”*.

$$q = -k\nabla T. \quad (5.1)$$

Siendo,  $q$  el flujo térmico,  $k$  la constante de conductividad del material y  $T$  la temperatura. La Primera Ley de Fick [20] define la ley de transporte de la materia. Establece que *“si en una mezcla de dos o más componentes existen diferencias de concentraciones, el flujo de la cantidad de sustancia es proporcional a la diferencia de concentraciones”*.

$$J_i = -D_{i,j}\nabla Y_i. \quad (5.2)$$

Siendo,  $J_i$  el flujo de la cantidad de sustancia,  $D_{i,j}$  el coeficiente de difusión molecular entre las especies  $i$  y  $j$  y  $Y_i$  la fracción másica de la especie  $i$ .

La Ley de Newton de las Viscosidad [21] expresa la ley de transporte de la cantidad de movimiento. Se enuncia como, *“las tensiones de cortadura de un fluido son directamente proporcionales al gradiente de velocidades entre las capas laminares contiguas”*.

$$\tau_{ij} = -\mu\nabla v. \quad (5.3)$$

Siendo,  $\tau_{ij}$  el flujo de cantidad de movimiento o tensor de tensiones,  $\mu$  la viscosidad y  $V$  la velocidad.

Se definen tres parámetros adimensionales que permiten establecer la importancia relativa de cada fenómeno de transporte en el análisis experimental [22].

El Número de Schmidt mide la influencia relativa del transporte viscoso frente a la difusión molecular.

$$Sc_{i,j} = \frac{\mu}{\rho D_{i,j}}. \quad (5.4)$$

El Número de Prandtl [34] muestra la influencia relativa de la viscosidad frente a la difusión térmica.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}. \quad (5.5)$$

El número de Lewis [35] establece la influencia relativa de la difusividad térmica frente a la difusión molecular.

$$Le_{i,j} = \frac{k}{c_p \rho D_{i,j}}. \quad (5.6)$$

Se toman como valores las propiedades del aire debido a que su proporción dentro de la cámara permite establecer la hipótesis de que toda la cámara está formada por este gas. En la Tabla 5.1 se indican las propiedades del aire en condiciones ambientales a 25°C y 1 atm y los coeficientes de difusión molecular del oxígeno y del DME en el aire.

**Tabla 5.1** Propiedades aire a 25°C y 1 atm y difusividad molecular del  $O_2$  y del DME en el aire

<i>Propiedades del aire a 25°C y 1 atm</i>					
Densidad	Calor específico	Conductividad térmica	Viscosidad dinámica	Difusividad molecular $O_2$	Difusividad molecular DME
$\rho[kg/m^3]$	$c_p[kJ/kgK]$	$k[W/mK]$	$\mu[Ns/m^2]$	$D_{O_2,aire}[m^2/s]$	$D_{DME,aire}[m^2/s]$
1.184	1.007	$255.1 \cdot 10^{-4}$	$1.849 \cdot 10^{-5}$	$2.08 \cdot 10^{-5}$	$1.49 \cdot 10^{-5}$

[]

En la Tabla 5.2 se muestran el número de Prandtl de la mezcla y los números de Schmidt y Lewis para los dosados pobres en los que el oxígeno no se consumirá completamente y para los dosados ricos en los que sobra DME en la mezcla final.

**Tabla 5.2** Número de Prandtl y números de Schmidt y Lewis en mezclas pobres y ricas

<i>Números adimensionales de la mezcla</i>				
$Pr$	$Sc_{O_2,Aire}$	$Sc_{DME,Aire}$	$Le_{O_2,Aire}$	$Le_{DME,Aire}$
0.729	0.751	1.048	1.03	1.43

La llama es el efecto visible de la combustión. Se debe a la excitación de los electrones que forman las moléculas de la mezcla que al alcanzar elevados estados energéticos saltan de unos orbitales a otros emitiendo fotones. Es por este motivo por lo que las llamas pueden tener diferentes colores en función de la longitud de onda de los fotones emitidos, dependiendo tanto del tipo de combustible como de la temperatura que se alcanza durante la combustión. A efectos fluido dinámicos, podemos entender las llamas como una interfase que separa los reactivos de los productos.

Según Chung K.Law en su libro Combustion Physics,” las llamas se pueden clasificar de diferentes maneras, atendiendo a varios criterios. La primera clasificación establece la manera en la que se mezclan los reactivos antes de la combustión. De esta manera se distingue entre dos tipos de llamas, las llamas de premezcla y las llamas de difusión.

Las llamas de premezcla se producen tras la mezcla previa del combustible y el comburente. Por el contrario, las llamas de difusión se producen sin una mezcla previa del combustible con el oxígeno. En la Figura 5.1 se puede observar cómo cambiaría, de forma representativa, la estructura de la llama en función de esta clasificación.



Figura 5.1. Llama de premezcla y de difusión.

Atendiendo al comportamiento fluido dinámico que pueden presentar las llamas, podemos realizar dos clasificaciones. La primera distingue entre el estado ordenado o caótico de las llamas, distinguiendo entre laminares y llamas turbulentas.

Las llamas laminares se caracterizan por su estructura ordenada siguiendo unos patrones que se repiten a lo largo del tiempo, pudiendo analizarse con líneas de corriente dentro de su seno. Las llamas turbulentas muestran un comportamiento caótico y desestructurado, provocando variaciones temporales en las magnitudes características. En la Figura 5.2 se distingue entre la llama laminar de una vela y una llama turbulenta.



Figura 5.2. Llama laminar y turbulenta.

Para establecer el régimen de una llama se utiliza el número de Reynolds. Este número adimensional mide la influencia relativa de las fuerzas convectivas frente a las fuerzas viscosas. Si  $Re < 2300$  aproximadamente, el flujo es laminar, por el contrario el flujo es turbulento. Determinamos el número de Reynolds con la siguiente expresión,

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu}. \quad (5.7)$$

Siendo,  $\rho$  densidad del aire,  $V$  la velocidad de propagación laminar de la llama,  $L_c$  una longitud característica de la geometría, y  $\mu$  la viscosidad dinámica del aire.

La segunda clasificación que atiende al comportamiento fluido mecánico de las llamas es aquella que tiene en cuenta su velocidad de propagación. Este aspecto, será determinante a la hora de estudiar la forma y propiedades de la llama, provocando dos comportamientos completamente distintos en función de si estamos en régimen subsónico o supersónico.

En las llamas subsónicas el frente de llama se desplaza a una velocidad por debajo de la velocidad del sonido del medio. Se conocen como deflagraciones, y en ellas domina el proceso de difusión molecular. En las llamas supersónicas se supera la velocidad del sonido del medio. Se conocen como detonaciones, y en ellas predomina el transporte convectivo. En la Figura 5.3 se muestra la diferencia entre una llama subsónica de una cocina de gas, frente a la llama supersónica del cohete espacial Falcon Heavy.



Figura 5.3. Llama subsónica y supersónica.

El número de Mach establece si la llama es subsónica o supersónica. Este número adimensional mide la velocidad relativa de un objeto respecto a la velocidad del sonido del medio en el que se propaga. El número Mach se puede escribir como,

$$M = \frac{V}{c}. \quad (5.8)$$

Siendo,  $V$  la velocidad de propagación laminar de la llama más rápida del estudio, y  $c$  la velocidad del sonido en el medio.

Una última clasificación determina el estado de agregación en el que se encuentran los reactivos, pudiendo distinguir entre llamas homogéneas y heterogéneas.

Una combustión es homogénea si los reactivos se encuentran en la misma fase. En cambio, una combustión es heterogénea cuando los reactivos presentan diferentes estados de agregación. En la Figura 5.4 se ilustra la llama homogénea de un mechero Bunsen, en la cual reacciona un combustible en estado gaseoso con el aire, y la llama de una hoguera provocado por la quema de carbón natural en estado sólido.



Figura 5.4. Llama homogénea y heterogénea.

El análisis experimental consiste en el estudio de una llama de premezcla de aire con un gas muy reactivo, por lo que se tiene una combustión homogénea. Una vez llenada la cámara se provoca la ignición, produciéndose una combustión subsónica y laminar.

En la Figura 5.5 aparece esquematizado el frente de llama plano de una llama de premezcla que avanza de izquierda a derecha a una velocidad  $v_F$ . Se puede apreciar como la mezcla se va quemando a medida que avanza la llama

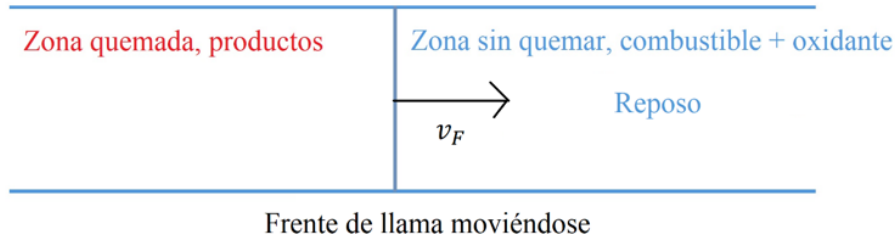


Figura 5.5. Frente de llama en movimiento.

Para poder entender el movimiento de las llamas de premezcla hay que enunciar las leyes de conservación que definen los problemas fluido dinámicos con especies reactivas [23].

La Ley de Conservación de la Masa, es común para todos los problemas fluido dinámicos. En una reacción química puede enunciarse como “*la suma de los reactivos de la reacción es igual a la suma de la masa de los productos*”. Esta ley se escribe como,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (5.9)$$

Siendo,  $\rho$  la densidad de la mezcla,  $t$  el tiempo y  $\vec{v}$  la velocidad local de la mezcla.

La Ley de Conservación de las especies [38], solo aparece cuando tenemos flujos reactivos. Establece que “*el consumo o la producción másica de cada especie química depende de la velocidad a la que aparece o desaparece la especie junto con la velocidad molecular a la que se difunde en el medio*”. Matemáticamente se expresa como,

$$\rho \left( \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla Y_i + \nabla \cdot \vec{J}_i \right) = \dot{m}_i. \quad (5.10)$$

Siendo,  $\rho$  la densidad de la especie  $i$ ,  $Y_i$  la fracción másica de la especie  $i$ ,  $t$  el tiempo  $\vec{v}$  el vector local de la velocidad de la especie  $i$ ,  $\vec{J}_i$  el flujo de la cantidad de sustancia  $i$  en la mezcla y  $\dot{m}_i$  el ratio de consumo o producción de la especie  $i$ .

La Ley de Conservación de la Cantidad de Movimiento [39], es la conocida Segunda Ley de Newton. Para un medio fluido puede definirse como “*la Fuerza o variación de la*

cantidad de movimiento respecto del tiempo, se debe a los esfuerzos viscosos a la presión y/o a las fuerzas másicas”. Se expresa como,

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla \vec{P} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_v + \rho \sum_{i=1}^M Y_i \vec{f}_{m_i}. \quad (5.11)$$

Siendo,  $\rho$  la densidad de la mezcla,  $t$  el tiempo,  $\vec{v}$  el vector local de la velocidad de la mezcla,  $\vec{P}$  la presión,  $\bar{\bar{\tau}}_v$  el tensor de esfuerzos,  $Y_i$  la fracción másica de la especie  $i$  y  $\vec{f}_{m_i}$  las fuerzas de volumen que actúan sobre la especie  $i$ .

La Ley de Conservación de la Energía [40] establece que “la energía ni se crea ni se destruye solo se transforma”. En forma diferencial se puede escribir como,

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \left( \sum_{i=1}^M \Delta h_{ci} \dot{m}_i \right) - \rho \nabla T \left( \sum_{i=1}^M c_{pi} \vec{J}_i \right) + v \nabla P + \\ + \bar{\bar{\tau}}_v : \nabla v + \rho \sum_{i=1}^M \vec{J}_i \vec{f}_{m_i}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Siendo,  $\rho$  la densidad de la mezcla,  $c_p$  la capacidad calorífica de la mezcla,  $T$  la temperatura local de la mezcla,  $k$  la conductividad térmica de la mezcla,  $\Delta h_{ci}$  la entalpía de combustión de la especie  $i$ ,  $\dot{m}_i$  el ratio de consumo o producción de la especie  $i$ ,  $\vec{J}_i$  el flujo de la cantidad de sustancia  $i$  en la mezcla,  $\vec{P}$  la presión,  $\bar{\bar{\tau}}_v$  el tensor de esfuerzos, y  $\vec{f}_m$  las fuerzas de volumen.

Una vez definido el problema y las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan, se establece las siguientes hipótesis para estudiar las llamas de premezcla unidimensionales [41]:

- Modelo unidimensional con frente de llama plano estacionario.
- Mezclas homogéneas con velocidades uniformes.
- Mezcla de gases ideal.
- Fuerzas másicas despreciables.
- Proceso adiabático.



En la Figura 5.6 se representa un frente de llama plano y estacionario para una llama de premezcla. La velocidad de propagación de la llama es igual a la velocidad a la que se desplazan los reactivos  $v_F = v_1$ .

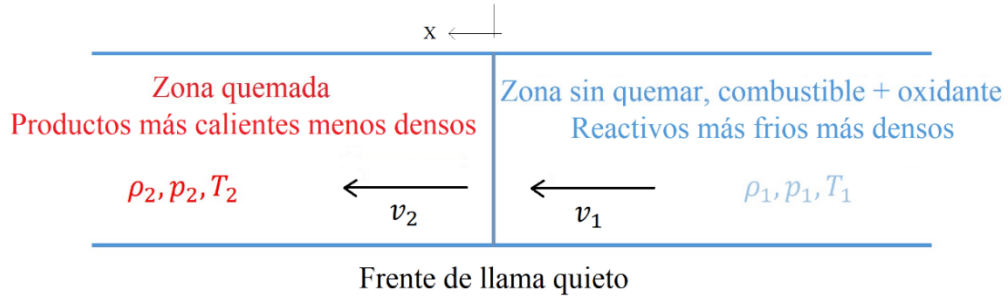


Figura 5.6. Esquema del frente de llama estacionaria de una llama de premezcla 1D.

Aplicando las hipótesis del modelo, la ecuación de conservación de la masa, se reescribe resultando [24],

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0. \quad (5.13)$$

Se resuelve la ecuación suponiendo conocidas la velocidad y la densidad inicial y final, obteniendo el siguiente resultado,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \rightarrow \int_{x_1}^{x_2} \frac{d}{dx}(\rho v) dx = 0 \rightarrow \rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \rightarrow \rho v = cte. \quad (5.14)$$

La ley de conservación de las especies resulta,

$$\rho v \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial J_i}{\partial x} + \dot{m}_i. \quad (5.15)$$

Se considera la ecuación de conservación del combustible, la cual se puede expresar el término  $J_i$  a través de la ley de Fick, además se incluye la solución de la ecuación (5.14),

$$\rho v \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial J_i}{\partial x} + \dot{m}_i \rightarrow \rho_1 v_1 \frac{\partial Y_c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_c \frac{\partial Y_c}{\partial x} \right) + \dot{m}_c. \quad (5.16)$$

Para el análisis no se necesita la ecuación de la cantidad de movimiento. Al despreciar las fuerzas másicas y viscosas, y tener un flujo subsónico la presión es constante  $P = cte$ . Por lo que,

$$P_1 = P_2 \quad (5.17)$$

Aplicando la ecuación de estado para una mezcla ideal (4.5) se obtiene que,

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2. \quad (5.18)$$

Y suponiendo que  $T_2 \gg T_1$ , ya que los productos se calientan, entonces  $\rho_1 \gg \rho_2$ . Por lo tanto, se puede afirmar que los gases por efecto del transporte de masa se moverán hacia la zona ya quemada.

Por último, la ley de conservación de la energía resulta,

$$\rho v c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \left( \sum_{i=1}^M \Delta h_{ci} \dot{m}_i \right). \quad (5.19)$$

Esta ecuación si se define  $Q\dot{m}_c$  como la energía liberada por unidad de masa del combustible, puede ser reescrita como,

$$\rho v c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \left( \sum_{i=1}^M \Delta h_{ci} \dot{m}_i \right) \rightarrow \rho_1 v_1 c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q\dot{m}_c. \quad (5.20)$$

Se van a realizar los siguientes cambios de variables, con el fin de resolver las ecuaciones (5.16) y (5.17):

$$\theta = \frac{(Y_{C1} - Y_C)}{Y_{C1}}. \quad (5.21)$$

$$\theta^* = \frac{c_p(T - T_1)}{QY_{C1}}. \quad (5.22)$$

Las condiciones de contorno son:

$$x \rightarrow -\infty, \quad Y = Y_1 \quad T = T_1 \quad \theta = \theta^* = 0.$$

$$x \rightarrow \infty, \quad \frac{dY}{dx} = \frac{dT}{dx} = 0 \quad \frac{d\theta}{dx} = \frac{d\theta^*}{dx} = 0.$$

Las ecuaciones (5.16) y (5.17) pueden escribirse en términos de los cambios de variable como,

$$\rho_1 v_1 \frac{d\theta}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \rho D_c \frac{d\theta}{dx} \right) + \frac{\dot{m}_C}{Y_{C1}}. \quad (5.23)$$

$$\rho_1 v_1 \frac{d\theta^*}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{k}{c_p} \frac{d\theta^*}{dx} \right) + \frac{\dot{m}_C}{Y_{C1}}. \quad (5.24)$$

Si el número de Lewis es igual o parecido a la unidad, tal y como se establece en la Tabla 5.2, las ecuaciones (5.23) y (5.24) son idénticas, lo que nos permite afirmar que,

$$\theta = \theta^*. \quad (5.25)$$

Lo que nos indica que solo se necesita resolver una de las dos ecuaciones. Resolviendo, con las condiciones de contorno indicadas, y deshaciendo el cambio de variable, se obtiene,

$$T = T_1 + \frac{(Y_{C1} - Y_C)Q}{c_p}. \quad (5.26)$$

Cuando  $Y_C = 0$ , tendríamos la máxima temperatura que coincide con la temperatura adiabática de llama.

$$x \rightarrow \infty, \quad Y = 0 \quad T_2 = T_{ad} = T_1 + \frac{Y_{C1}Q}{c_p}. \quad (5.27)$$

El valor máximo de  $Y_{C1}$  y por lo tanto de  $T_2$  se corresponde con la composición estequiométrica. De forma alternativa despejando  $Q$  de (5.26) y (5.27) se obtiene la fracción másica del combustible en función de la temperatura,

$$Y_C(T) = Y_{C1} \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1}. \quad (5.28)$$

En la Figura 5.7, se muestra la relación directa entre  $T$  e  $Y_C$ .

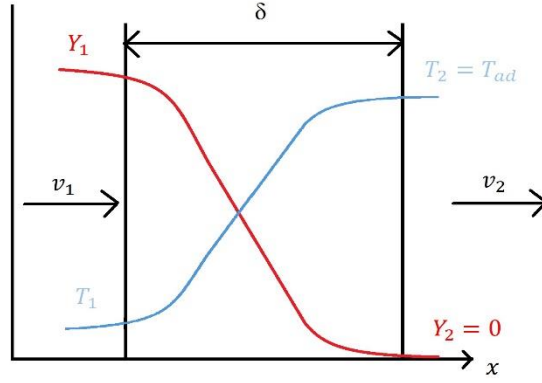


Figura 5.7. Esquema del espesor de la llama y relación entre la temperatura de la llama y la fracción másica del combustible.

Por otro lado, la reacción química, es muy sensible a la temperatura, y ocurre en una región donde la temperatura es muy próxima a la máxima. Matemáticamente podemos expresarlo como una ecuación del tipo Arrhenius,

$$\frac{\dot{m}_c}{Y_{C1}} = \rho \frac{Y_C}{Y_{C1}} B_0 e^{-\frac{T_a}{T}}. \quad (5.29)$$

Siendo,  $\dot{m}_c$  el consumo másico del combustible,  $Y_{C1}$  la fracción másica inicial del combustible,  $\rho$  la densidad,  $Y_C$  la fracción másica del combustible en un determinado momento,  $B_0$  el factor preexponencial de la ecuación de Arrhenius,  $T_a$  la temperatura de activación y  $T$  la temperatura de la mezcla en un determinado momento.

A partir de las ecuaciones (5.18), (5.21) y (5.22) se establece,

$$\rho = \rho_1 \frac{T_1}{T}. \quad (5.30)$$

$$\frac{Y_C}{Y_{C1}} = 1 - \theta. \quad (5.31)$$

$$T = T_1 + (T_2 - T_1)\theta. \quad (5.32)$$

Lo que permite definir una función que depende de  $\theta$  a partir de la ec.54,

$$f(\theta) = \frac{\dot{m}_c}{Y_{c1}} = \frac{\rho_1(1-\theta)}{1 + \left(\frac{T_2-T}{T_1}\right)\theta} B_0 e^{-\frac{T_a}{T_1 + (T_2-T_1)\theta}}. \quad (5.33)$$

En la Figura 5.8 se representa  $f(\theta)$  y  $\theta$ , en función de  $x$ .

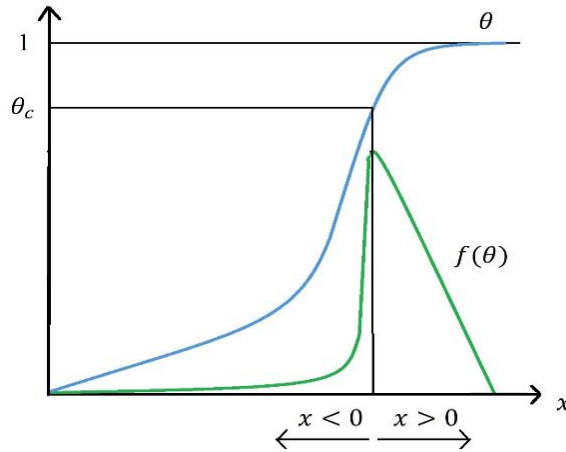


Figura 5.8. Esquema de la llama para la zona reactiva.

Presenta un máximo muy acusado para  $\theta_c = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)$ , con  $\beta = \frac{T_a + (T_2 - T_1)}{T_2^2}$ .

Gracias a este análisis se establece que la llama presenta dos zonas diferenciadas. La primera es una zona de precalentamiento de la mezcla, situada entre  $[-\infty, 0]$ , donde predominan los transportes difusivos y convectivos. La ecuación (5.23) no tendrá término de gasto másico de combustible en esta zona.

$$\rho_1 v_1 \frac{d\theta}{dx} = \rho_1 D_c \frac{d^2\theta}{dx^2}. \quad (5.34)$$

Se puede integrar dos veces con las condiciones de contorno,

$$x \rightarrow -\infty, \quad \theta = 0 \quad y \quad \theta(x = 0) = \theta_c.$$

Finalmente, se obtiene una ecuación para la variable  $\theta$ .

$$\theta = \theta_c e^{\left(\frac{v_1}{D_c} x\right)}. \quad (5.35)$$

Siendo,  $\delta = \frac{D_c}{v_1}$  el espesor de la llama.

La segunda zona está situada entre  $[0, \infty]$ , en ella se produce la reacción de combustión. En esta zona en la ecuación (5.23) si incluirá el término de gasto másico de la combustión.

$$\rho_1 v_1 \frac{d\theta}{dx} = \rho_1 D_c \frac{d^2\theta}{dx^2} + \rho_1 I_R (1 - \theta). \quad (5.36)$$

Donde,  $I_R$  representa la velocidad de propagación de la reacción.

Se puede integrar dos veces con las condiciones de contorno,

$$x \rightarrow \infty, \quad \theta = 1 \quad y \quad \theta(x = 0) = \theta_c.$$

Obteniéndose,

$$\theta = 1 - (1 - \theta_c) e^{(\alpha x)}. \quad (5.37)$$

Con

$$\alpha = \frac{v_1 - \sqrt{v_1^2 + 4D_1 I_R}}{2D_1}. \quad (5.38)$$

La velocidad máxima de la llama se alcanzará para el valor  $x = 0$ . De este modo tomando las derivadas laterales,

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0^-} = \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0^+}. \quad (5.39)$$

$$(\theta_c - 1)\alpha = \theta_c \frac{v_1}{D_c}. \quad (5.40)$$

$$v_F = v_1 \sim \frac{\sqrt{I_R D_1}}{\beta}. \quad (5.41)$$

Esta velocidad se define como la velocidad laminar de propagación de la llama. En la Figura 5.9 se muestra la velocidad laminar teórica de la llama de DME en función del dosado

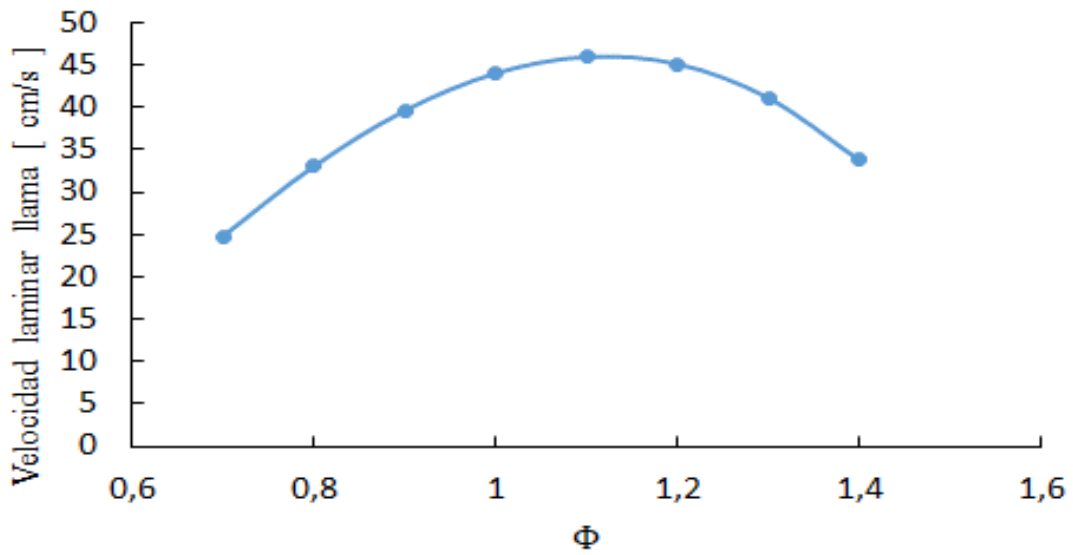


Figura 5.9. Velocidad laminar teórica de la llama en función del dosado.



De este análisis unidimensional y estacionario de la llama de premezcla se concluye:

- La llama es una entre fase que divide la zona de los productos y de los reactivos
- Se divide en dos zonas diferenciadas, una zona de precalentamiento y otra zona donde tiene lugar la reacción química.
- El espesor de la llama depende de la difusión molecular y de la velocidad de propagación de la llama.
- Su velocidad de propagación dependerá tanto de la velocidad de difusión molecular como de la velocidad de la reacción química.



## 6. ANÁLISIS DE LAS INESTABILIDADES DE LAS LLAMAS DEL DME

El estudio de las llamas de premezcla plano presentado en la sección 5 está limitado a una serie de hipótesis que resultan útiles para entender los parámetros de los que depende el espesor de la llama y su velocidad de propagación. Sin embargo, el frente de llama generalmente no es plano y suele presentar inestabilidades. En este proyecto se hablará de tres tipos [25]:

- Inestabilidades hidrodinámicas.
- Inestabilidades termo-difusivas.
- Inestabilidades termo-acústicas.

Las inestabilidades hidrodinámicas se deben principalmente a la diferencia de densidades entre la mezcla fresca de los reactivos más fría y la de los gases quemados, más calientes. Existen varios tipos de inestabilidades hidrodinámicas.

El fenómeno hidrodinámico se conoce como inestabilidad de Darrieus-Landau o simplemente DL, en honor a los científicos que la estudiaron. Este tipo de inestabilidad consiste en la desviación de las líneas de corriente. Su origen tiene lugar en la aparición de gradientes de presión en el seno de la reacción, lo que va a originar zonas que se quemen antes o después del mismo plano perpendicular de la celda de combustión, lo que origina que aparezcan zonas con diferentes densidades y por lo tanto, con velocidades

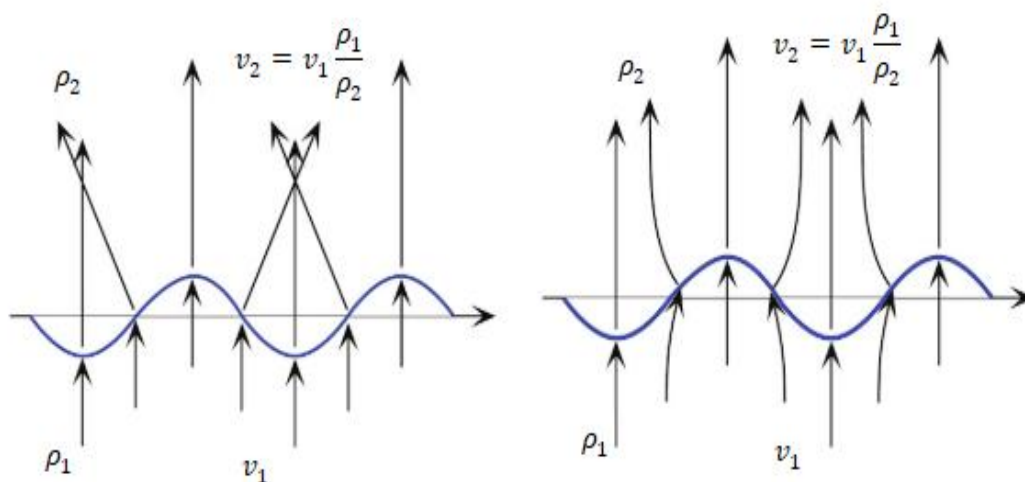


Figura 6.1. Inestabilidad de Darrieus-Landau (DL).

distintas, provocando que se curve el frente de llama apareciendo corrugaciones tal y como se observa en la Figura 6.1.

Un caso de inestabilidad hidrodinámica es el fenómeno conocido como “*efecto pistón*”. En los casos en los que se deja salir los gases quemados fuera de la cámara de combustión, la velocidad de propagación es igual a la velocidad a la que se desplazan los reactivos hacia la llama,  $v_F = v_1$ . Sin embargo, cuando los gases quemados se quedan confinados en la celda de combustión, la llama se verá acelerada a una velocidad igual a la de los gases quemados que impulsarán la mezcla al no poder escapar de la cámara. La velocidad de los gases quemados será mucha más rápida que la de la mezcla fresca tal y como se deduce de la solución de la ecuación de continuidad (5.14) teniendo en cuenta que  $\rho_1 \gg \rho_2$ .

$$v_2 = v_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (6.1)$$

Otra característica de estudio es la formación de lóbulos y “*cusps*”. Este fenómeno ocurre a medida que se propaga la llama debido al solapamiento de las diferentes corrugaciones de la llama, es decir, a medida que la llama avanza las inestabilidades de tipo DL se reducen en número, haciéndose cada vez más grandes. En la Figura 6.2 se observa el mecanismo de formación de los lóbulos.

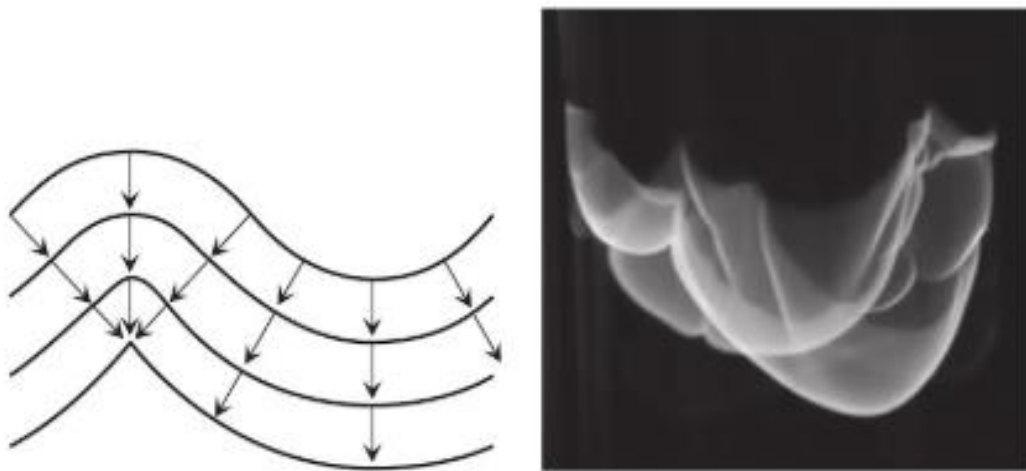


Figura 6.2. Mecanismo de formación de lóbulos en el frente de la llama.

Las inestabilidades termo-difusivas se deben a la competición entre la difusión molecular de las especies químicas y la difusión de calor. Los gradientes de concentración y temperatura tal y como se ha comprobado en la sección 5, varían de forma inversa. Esto provoca que cuando el frente de llama es localmente convexo hacia la zona de la mezcla sin quemar el flujo transversal de calor tienda a enfriar la zona de reacción reduciendo la velocidad local de la llama. No obstante, el flujo transversal de la cantidad de sustancia proporciona un extra de reactivos en la zona de reacción produciendo el efecto contrario. El resultado neto depende del número de Lewis. En la Figura 6.3 se muestra este fenómeno.

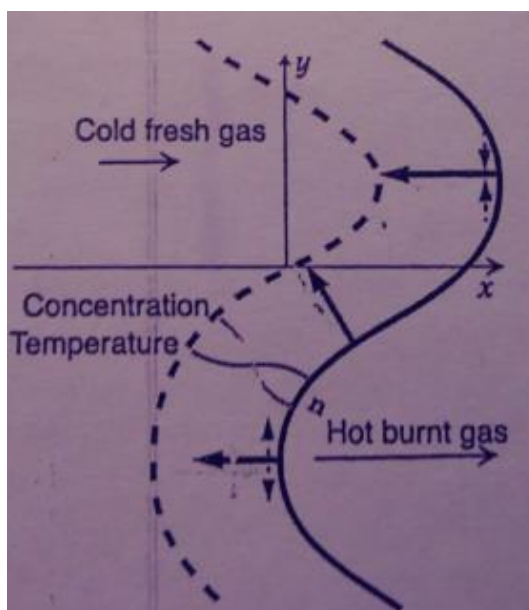


Figura 6.3. Inestabilidad termo-difusiva.

Las inestabilidades termo-acústicas se producen cuando se tienen llamas con la velocidad suficiente como para producir ondas sonoras que se acoplen con el avance de esta. Estas ondas de presión interactuarán con el frente de diferentes maneras se modificará la velocidad de reacción debido al cambio local de presión. Por otro lado, las ondas pueden modificar la estructura del frente modificando su área y por lo tanto, produciendo una aceleración o una desaceleración de la zona de reacción.



**PARTE II:**

**PROCEDIMIENTO PRÁCTICO  
PARA EL ANÁLISIS DE LAS LLAMAS  
DE PREMEZCLA DE DME**





## 7. MONTAJE Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se va a describir el montaje del experimento y la metodología llevada a cabo para repetir los ensayos con tres configuraciones de la celda. Cada configuración dependerá de cómo estén dispuestas su entrada y su salida, respectivamente: abierto-cerrado, abierto-abierto y cerrado-abierto. La entrada es la zona más cercana a la bujía y la salida el lado opuesto.

En la Figura 7.1 se muestra la instalación en la cual se realizan los diferentes ensayos.

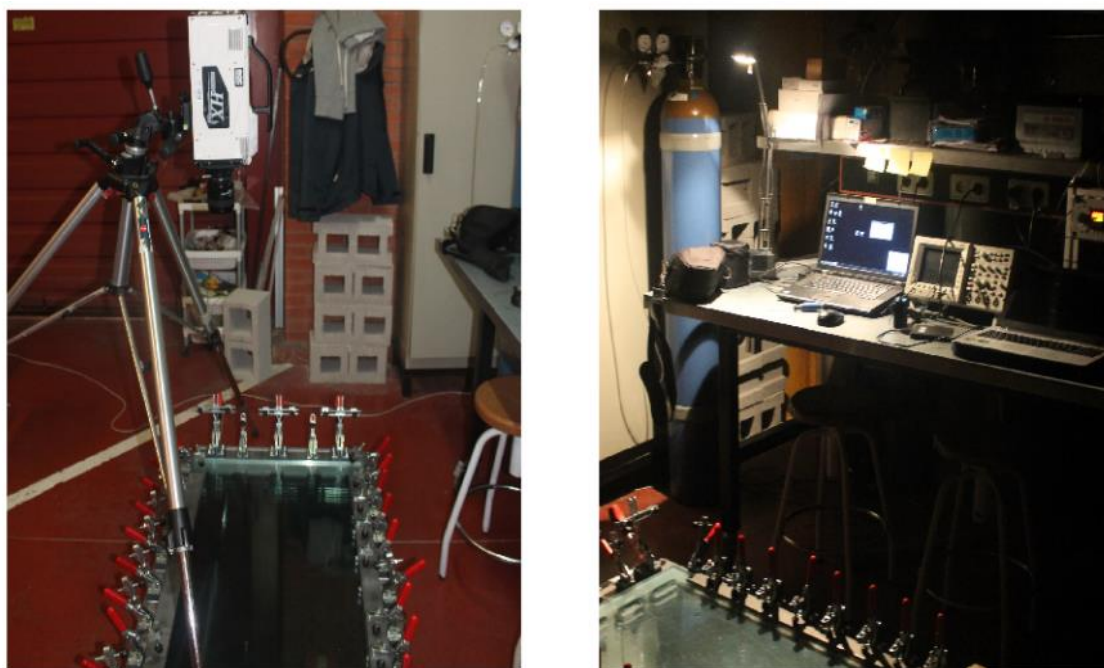


Figura 7.1. Instalación del ensayo experimental.

La instalación está compuesta por dos elementos principales, la cámara de combustión y la cámara de alta velocidad; más diferentes elementos auxiliares que facilitan el almacenaje del DME, el llenado de la cámara y el control de la combustión.

La cámara de combustión es un instrumento que ha sido fabricado por la Universidad Carlos III de Madrid en el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Consiste en una “*celda Hele-Shaw*” en la que tienen lugar las reacciones de combustión. En la Figura 7.2 se presenta una imagen real de la cámara.

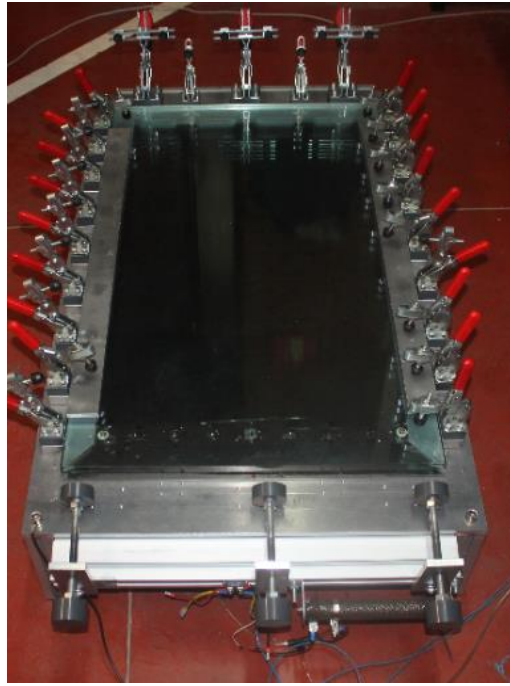


Figura 7.2. Celda Hele-Shaw utilizada en el ensayo experimental.

Una celda de Hele-Shaw es un montaje experimental utilizado para el estudio de flujos bidimensionales. En la Figura 7.3 se ha esquematizado la celda mostrando su perspectiva isométrica y en planta, realizada con el software de diseño gráfico “*SketchUp*”. Las cotas que se muestran en la planta representan las dimensiones que enfocará la cámara de alta velocidad. De este modo, las imágenes obtenidas enseñarán esta porción de la celda. El espesor de la cámara es de 1cm y, por lo tanto, su volumen de  $0.004 \text{ m}^3$ .

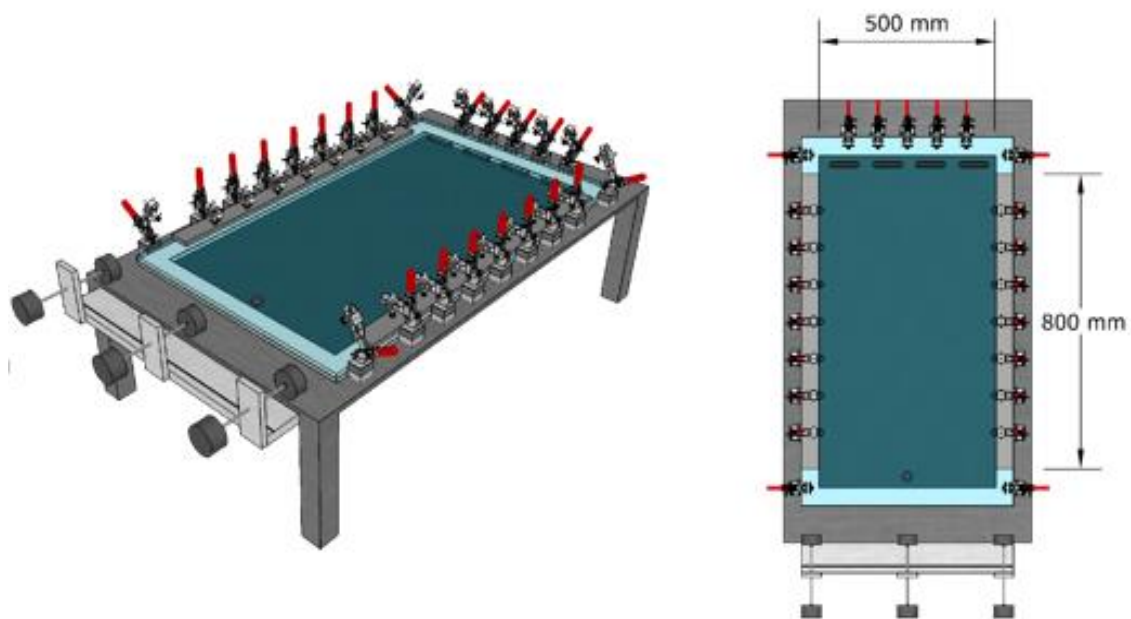


Figura 7.3. Perspectiva isométrica y planta de la celda Hele-Shaw.

A continuación, se describen los elementos que forman la celda. En la Figura 7.4 se muestra el explosionado de la cámara de combustión, en la que se enumeran los diferentes componentes.

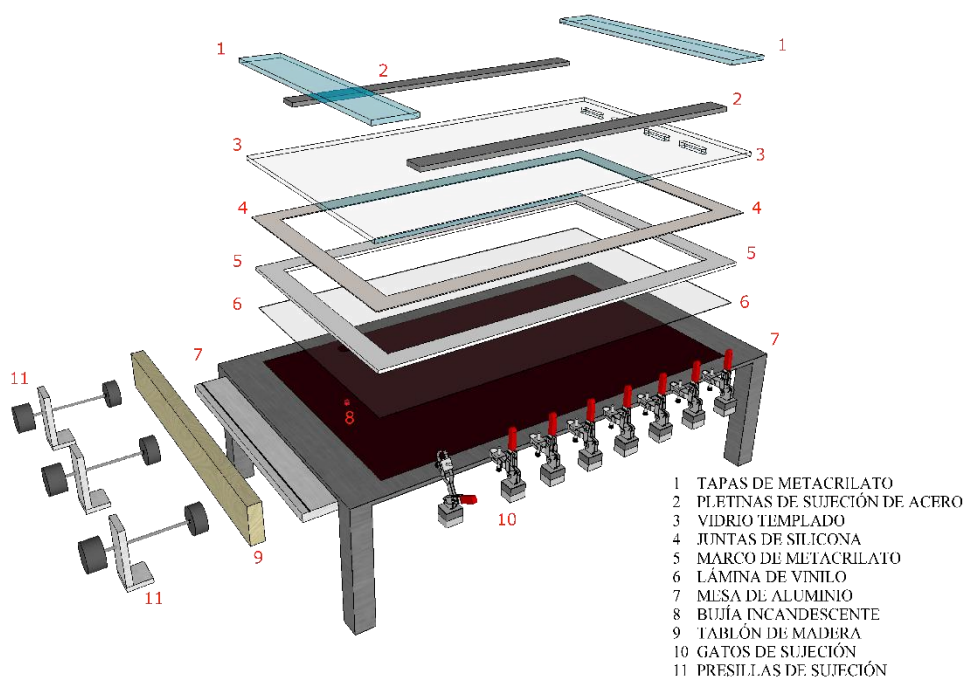


Figura 7.4. Explosionado de la cámara de combustión

Las tapas de metacrilato (1), tienen la utilidad de cerrar la entrada y/o la salida de la cámara dependiendo de la configuración de estudio.

Las pletinas de sujeción de acero (2) presionan el vidrio contra la mesa evitando posibles fugas.

El vidrio templado (3) cierra por la parte superior la cámara de combustión. Su transparencia permite observar las llamas a través de él.

La junta de silicona (4) sella los bordes de la cámara y evita posibles fugas.

El marco de metacrilato (5) genera el espacio donde se va a cargar la mezcla. Se utilizan dos tipos de marcos, el primero con forma de U, está abierto por el lado más cercano a la bujía y se emplea en los casos abierto-cerrado y abierto-abierto. El segundo, con forma de O, está completamente cerrado y se utiliza para el caso cerrado-abierto.

La lámina de vinilo (6), aísla térmicamente la celda de la mesa (8), evitando posibles pérdidas de calor cuando se propagan las llamas.

La mesa de aluminio (7) tiene una función estructural, soportando el peso del resto de los componentes. Su fondo de color negro sirve de contraste con la luminosidad de las llamas facilitando la toma de imágenes.

La bujía incandescente Bosch Duraspeed (8), produce el encendido de la mezcla. Este tipo de bujía se utiliza para el calentamiento de los motores de combustión tipo Diésel facilitando la ignición en el arranque y en condiciones frías. Con el DME, su aporte energético es suficiente como para producir la ignición. Su encendido se realiza con una batería que proporciona un voltaje de 12V de CC. Para su control se dispone de un temporizador. En la Figura 7.5 se presenta una imagen en detalle de la bujía.

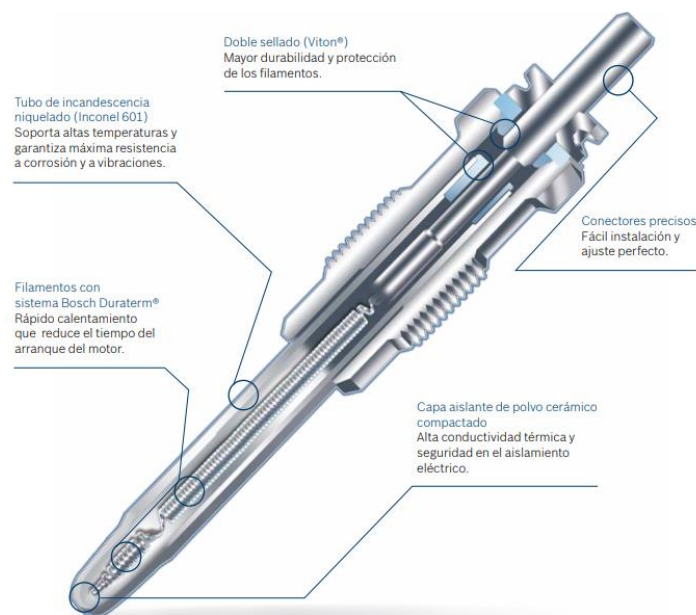


Figura 7.5. Bujía incandescente Bosch Duraspeed.

El tablón de madera (9) permite que la mezcla no se escape por la entrada durante el llenado de la cámara en los casos abierto-cerrado y abierto-abierto.

Los gatos (10) y las presillas de sujeción (11) permiten el cierre del resto de elementos que componen la celda.

La cámara de velocidad súper lenta es el dispositivo que permite capturar y digitalizar el fenómeno físico. Se trata de una cámara “*Memrecam HX3*”, que pertenece al Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. Presenta una resolución de hasta 5 Mega Píxeles a 2000 fps (frames por segundo), y puede llegar a grabar hasta 1.300.000 fps. En los ensayos no se superarán los 4000 fps para no perder resolución espacial y por tanto, información útil. Para su control, la cámara va



conectada a un ordenador desde el que manejaremos la captura de las fotografías. En la Figura 7.6 se presentan dos fotografías de la cámara de velocidad súper lenta.

El tanque de almacenamiento permite conservar el DME a altas presiones. Cuenta con dos válvulas de apertura y dos manómetros de medición. En la Figura 7.7 se muestra, el

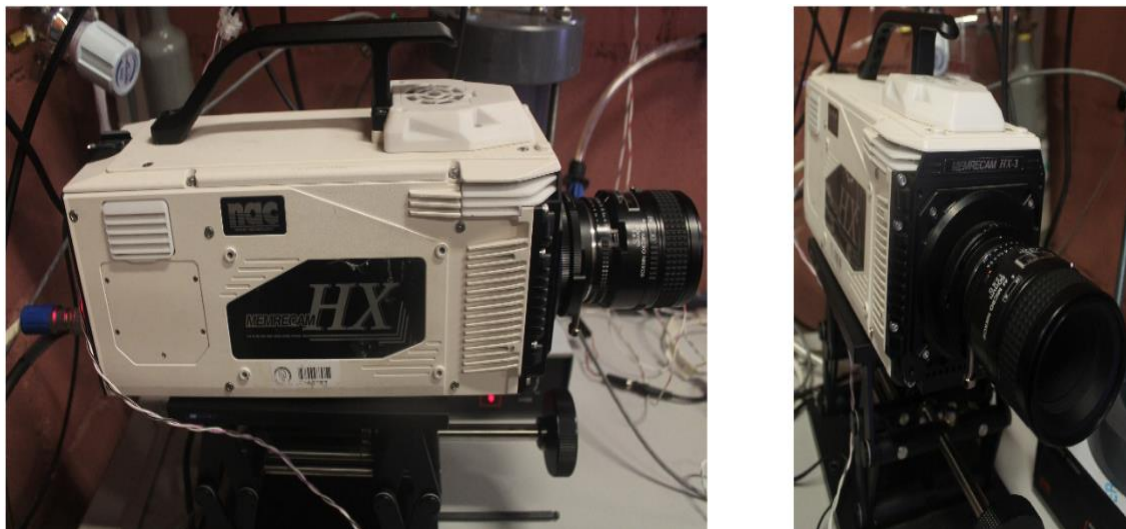


Figura 7.6. Cámara de velocidad súper lenta Memrecam HX3.

tanque de almacenamiento y una vista en detalle de las válvulas y los manómetros. La primera válvula situada en la parte superior del tanque permite abrir o cerrar la salida del gas, su apertura es controlada por el manómetro de la derecha de la imagen. Por su parte, la segunda válvula permite el paso del gas hacia el mezclador, la presión de salida del DME será controlada con el manómetro de la izquierda y no superará los 2.5 bar.

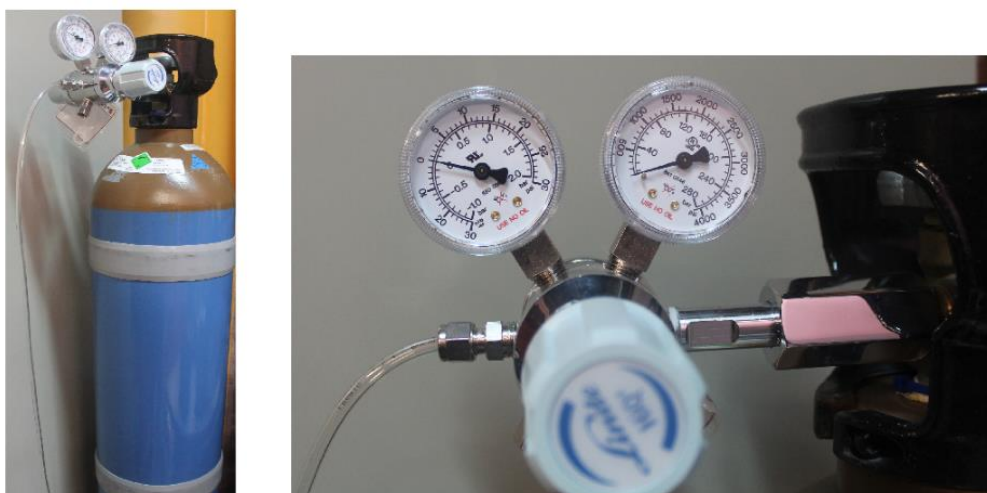


Figura 7.7. Tanque de almacenamiento y vista en detalle de las válvulas y manómetros de control de salida del DME.

La válvula de aire permite introducir este gas a presión desde un tanque de almacenamiento de aire comprimido fuera de la instalación. La presión de entrada no será superior a 1.5 bar. En la Figura 7.8, se muestra una imagen de la válvula.



Figura 7.8. Válvula de entrada del aire.

Para regular el dosado se dispone de dos controladores de flujo másico de gases. El controlador del aire “*Omega FMA5418A*”, proporciona un caudal másico constante e igual a 2.4 SLPM (Standard Litre Per Minute). Por su parte, el controlador del DME “*Sierra Smart Track 100*” se maneja mediante un software específico desde el ordenador, y permite regular los diferentes flujos másicos, que se establecen en función de los diferentes dosados. En la figura 7.9 se presentan los dos controladores.

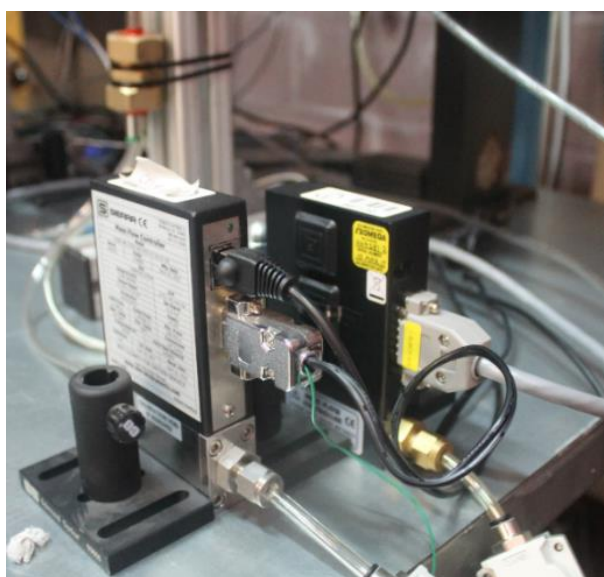


Figura 7.9. Controladores de flujo másico del DME y del aire.

Para manejar el controlador del DME se utiliza el software “*Smart Track 2*” proporcionado por la empresa suministradora del producto, el cual permite escoger el tipo de gas que se introduce en la mezcla y regular su flujo másico. En la Figura 7.10, se muestra una imagen de la consola que nos permite manejar el flujo másico del combustible.

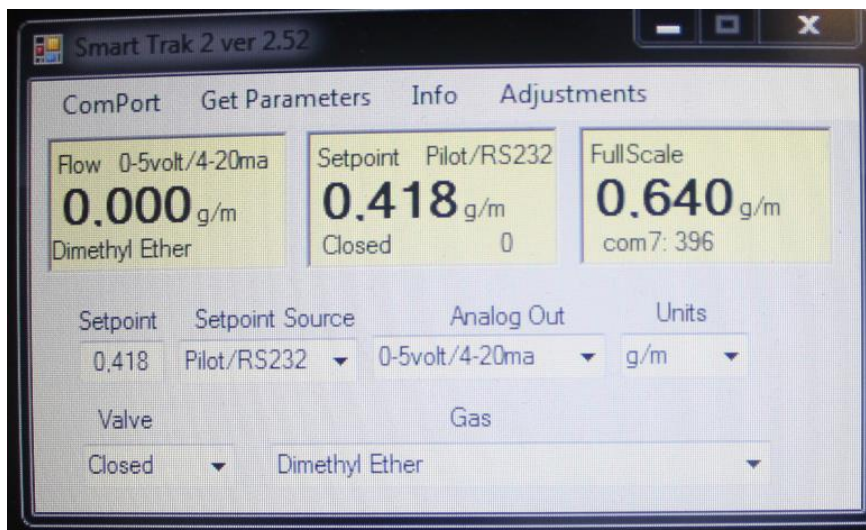


Figura 7.10. Consola del software Smart Track 2, Setpoint dosado 1.3.

A partir de las relaciones estequiometrias se calcula el gasto másico del DME para los diferentes dosados como se presenta en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1.** Flujo másico del DME para los diferentes dosados

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Flujo másico</b>								
<b>[g/min]</b>	0.225	0.257	0.289	0.322	0.354	0.386	0.418	0.45

El mezclador de fluidos permite juntar los caudales del DME y del aire. En la Figura 7.11 se presenta el mezclador, al cual le llegan por la parte inferior dos tubos que traen los gases, y sale por la parte superior la mezcla.

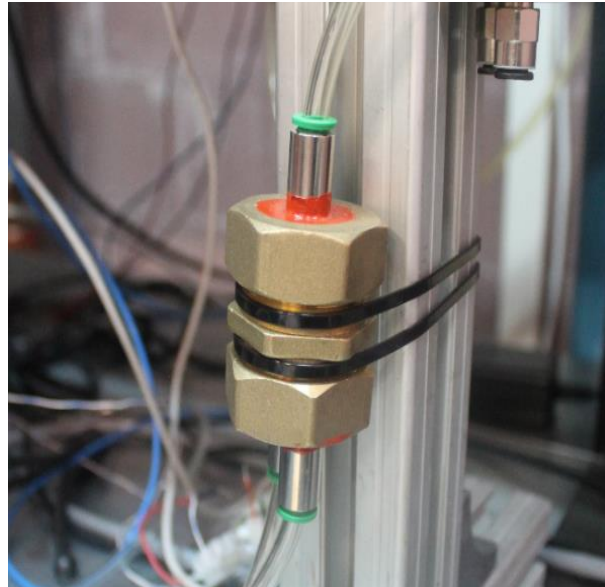


Figura 7.11. Mezclador de fluidos.

El montaje presenta una válvula de bola como elemento de seguridad para evitar posibles llenados no previstos de la cámara. En la Figura 7.12 se observan dos imágenes, la primera, la válvula está abierta y la cámara, por lo tanto, se está llenando; en la segunda, la válvula está cerrada y por lo tanto no hay flujo alguno de mezcla entrando en la cámara de combustión.

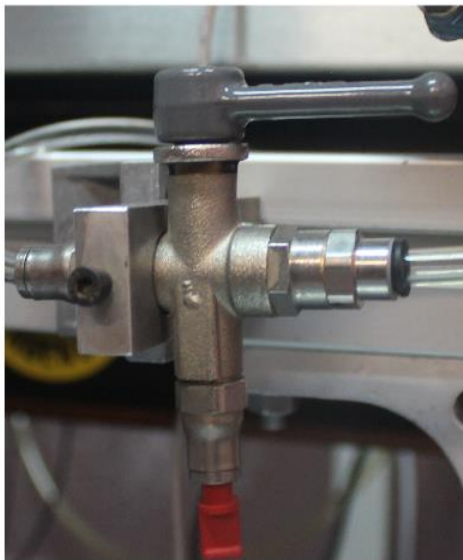


Figura 7.12. Válvula de seguridad, abierta a la izquierda y cerrada a la derecha.

La instalación cuenta con una batería de coche Bosch S3-004, que proporciona un voltaje de 12V y una corriente de 53 Ah. Su función es proporcionar corriente eléctrica a la bujía



durante el encendido de la mezcla. En la Figura 7.13 se presenta una imagen de la batería utilizada.



Figura 7.13. Batería de coche Bosch S3-004.

El botón de encendido permite regular el tiempo durante el cual la batería suministra corriente a la bujía. Se ha establecido 2.5 segundos como tiempo suficiente para calentar la mezcla hasta la temperatura de auto ignición entre 235-350 °C, proporcionándose la energía necesaria de activación de la reacción. En la Figura 7.14, se muestra el botón de encendido con el temporizador.



Figura 7.14. Botón de encendido y temporizador.

Una vez explicados todos los componentes, se va a detallar la metodología llevada a cabo durante los experimentos. Se repite cada ensayo para los diferentes dosados de las tres configuraciones de estudio.

El proceso rutinario consiste en primer lugar abrir el tanque de almacenamiento de DME y la válvula del flujo de aire. A continuación, con el ordenador se establece el flujo másico del DME que se une con el flujo másico de aire constante, en el mezclador llegando finalmente a la cámara de combustión en las proporciones deseadas. Hay que esperar un tiempo mínimo hasta que se llene la cámara de combustión. Para calcularlo se tiene en cuenta el flujo másico total, junto con el volumen de la cámara, utilizada

$$t = \frac{V_T}{\left( \frac{\dot{m}_{C_2H_6O}}{\rho_{C_2H_6O}} + \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}} \right)} \quad (7.1)$$

Siendo,  $V_T$  el volumen total de la cámara de combustión,  $\dot{m}_{C_2H_6O}$  el flujo másico del DME,  $\dot{m}_{aire}$  el flujo másico del aire,  $\rho_{C_2H_6O}$  la densidad del DME y  $\rho_{aire}$ , la densidad del aire.

En la Tabla 7.2 se establecen los tiempos de llenado de la cámara para cada dosado.

**Tabla 7.2.** Tiempo de llenado de la cámara de combustión en función del dosado

	$\Phi$							
	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>Tiempo</b>								
<b>[min]</b>	1.6	1.59	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53

Para asegurarnos del llenado completo, esperaremos 2 minutos en cada ensayo.

A continuación, se procede a la ignición de la mezcla y a la recogida de imágenes con la cámara de velocidad súper lenta, para el posterior tratamiento de imagen y obtención de resultados, tal y como se explican en los siguientes apartados.

Se presenta en la Tabla 7.3, el presupuesto de la instalación.

**Tabla 7.3.** Presupuesto del proyecto

Sistema	Partes	Coste [ € ]
Cámara de combustión	Tapa de vidrio	435
	Marco de metacrilato	70
	Sellante de silicona	30
	Plancha de vinilo	15
	Gatos	300
Sistema de encendido	Bujía	12
	Batería	100
	Temporizador	200
Sistema de llenado	Tubería y válvulas	50
	Controlador de combustible	2300
	Controlador de aire	900
Tanque de almacenamiento	DME	700
Video	Cámara	70000
	Portátil	700
Mano de obra	Sueldo ingeniero (12€/h)	3600
Total		79412



## 8. TRATAMIENTO DE IMAGEN

El tratamiento de imagen consiste en el procesamiento digital de las imágenes obtenidas durante los ensayos, con el fin de conseguir información y datos relevantes para nuestro estudio. La digitalización se realiza mediante la división de las imágenes en píxeles, con el propósito de mejorar su calidad o facilitar la búsqueda de información, mediante la aplicación de diferentes filtros.

Las llamas de una reacción de combustión son difíciles de estudiar debido principalmente a su relativa gran velocidad de propagación, lo que hace complicado su medición directa. El presente estudio, utiliza una técnica basada en la toma de fotografías del fenómeno físico con la cámara de súper lenta ya presentada, para después convertirlo en un vídeo mediante la sucesión temporal de cada frame. Posteriormente, se analizan los vídeos mediante el lenguaje de programación “*Matlab*”.

Se va a detallar el procedimiento llevado a cabo. En primer lugar, una vez llenada la celda Hele-Shaw con la mezcla y dosado deseado, se procede a su ignición e instantáneamente se toman las fotos de la cámara de combustión para la configuración determinada. De esta manera, se consigue digitalizar las imágenes de la reacción. En la Figura 8.1, se muestra a modo de ejemplo una sucesión de imágenes superpuestas de la llama de la configuración cerrado-abierto para el dosado 1, la llama avanza de izquierda a derecha.

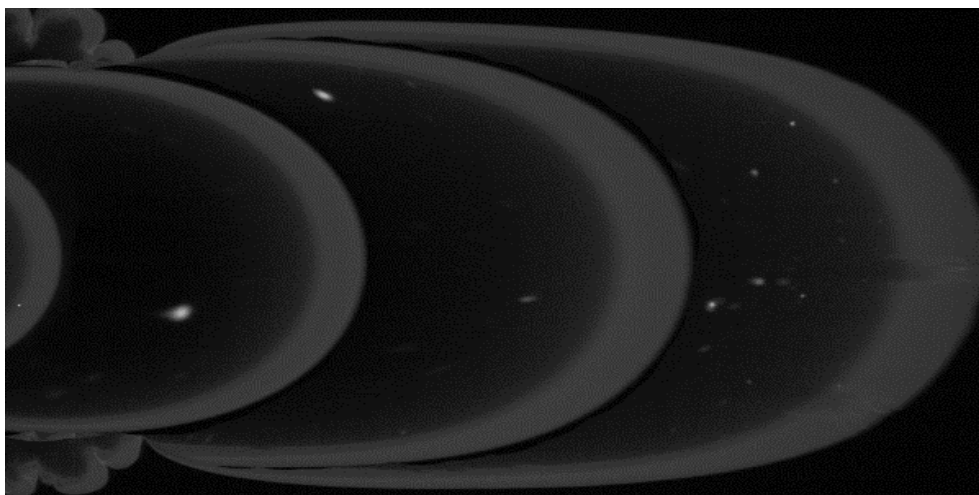


Figura 8.1. Avance del frente de la llama de izquierda a derecha para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.

A continuación, se ha decidido utilizar el software “*Adobe After Effects*”, con el fin de montar los vídeos mediante la lectura sucesiva de cada frame, y aplicar diferentes filtros que facilitan la lectura de los vídeos al ser procesados en Matlab.

Un filtro es una operación matemática lógica que permite modificar los parámetros de intensidad y/o color de cada pixel. En nuestro caso, se ha aplicado filtros de balance de blancos y negros, con el fin de provocar un mayor contraste entre el fondo de la cámara y la llama. En la Figura 8.2 se muestra una sucesión de imágenes superpuestas de la llama de la configuración cerrado-abierto para el dosado 1 una vez tratado con el programa Adobe After Effects.



Figura 8.2. Avance del frente de la llama de izquierda a derecha para la configuración cerrado-abierto y dosado 1 tratado con un filtro de balance de blancos y negros.

En la configuración abierto-cerrado, el análisis del vídeo es más complicado debido al poco espesor de la llama, para tratarlo se aplicó un filtro de “*desenfoque Gaussiano*” que permite cerrar el perfil eliminando el ruido de la imagen.

Una vez digitalizadas y filtradas las imágenes, se procesa el video con el “Script” creado en Matlab. El código se adjunta en el Anexo A.

El código en primer lugar compila el vídeo extrayendo sus datos, tales como el número de frames, su duración, la velocidad a la que se procesa cada frame, así como el número de pixeles en los que está dividida nuestra imagen tanto en dirección vertical como horizontal. En la Figura 8.3 se presenta la división en pixeles de las imágenes de cada vídeo.

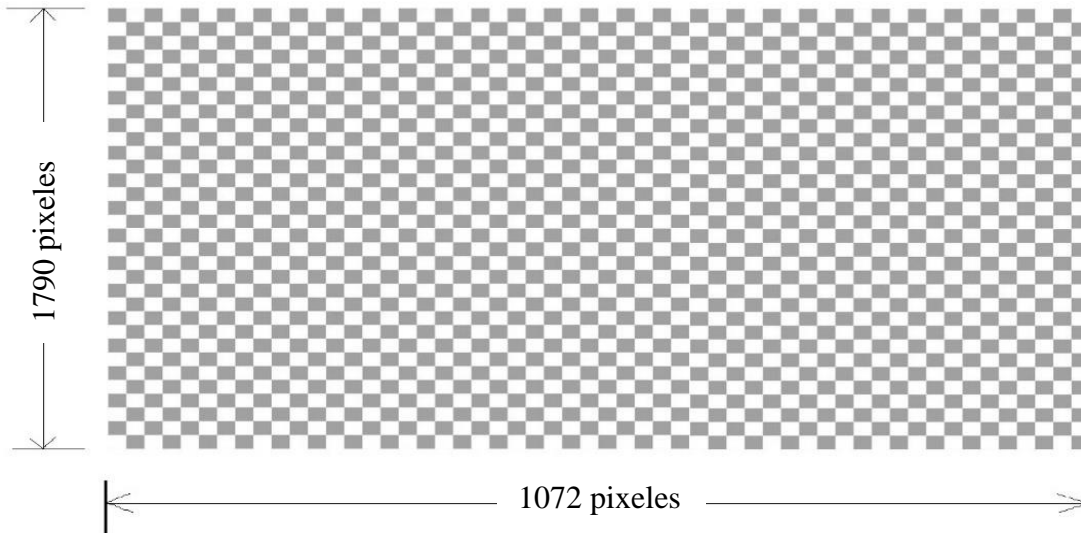


Figura 8.3. División de la cámara de combustión en píxeles 1792x1072.

Una vez definidas las variables iniciales de nuestro vídeo, el programa reproduce la simulación. Esta consiste en leer a cada paso de tiempo un frame, y segmentar la imagen asignando un valor de 0 (negro) si la imagen no reconoce el borde de la llama, y 1 (blanco) si lo hace consiguiendo de esta manera el frente de la llama. En la Figura 8.4, se muestra una secuencia de imágenes del frente de la llama.

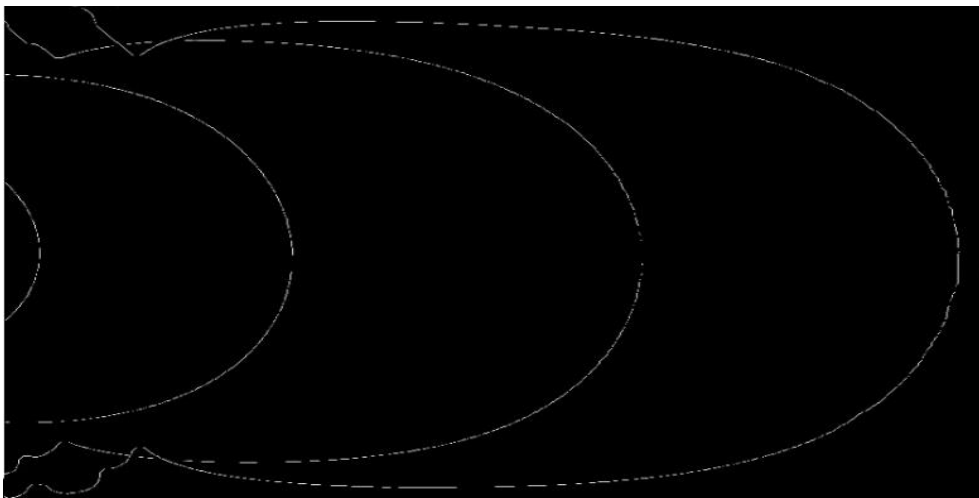


Figura 8.4. Perfil de la llama para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.

Una vez segmentada cada imagen, se obtiene las coordenadas x-y de cada punto que define el perfil de la llama. Esto permite analizar en mayor detalle la llama. En la Figura 8.5 se representa una secuencia de los frentes obtenidos en un eje cartesiano.

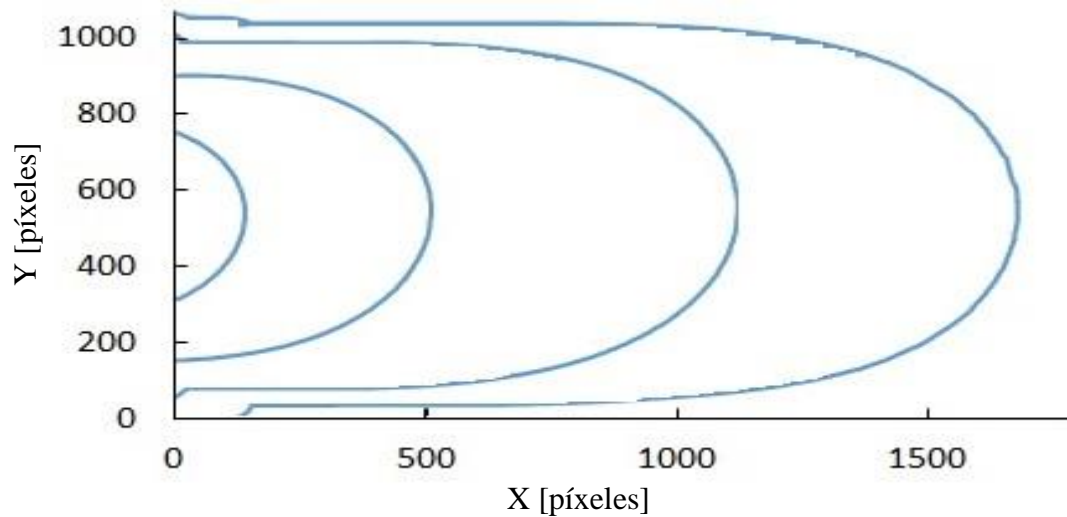


Figura 8.5. Gráficas x-y del perfil de la llama para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.

Para el análisis de la posición de la zona de reacción en cada instante, se define el área quemada como el área debajo de la curva anteriormente definida, para obtener su valor basta con integrar las funciones de x-y. Una vez integradas todas las curvas, se almacenan las áreas quemadas, obteniéndose la posición media del frente en función del tiempo. En la Figura 8.6 se establece el área quemada en función del tiempo para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.

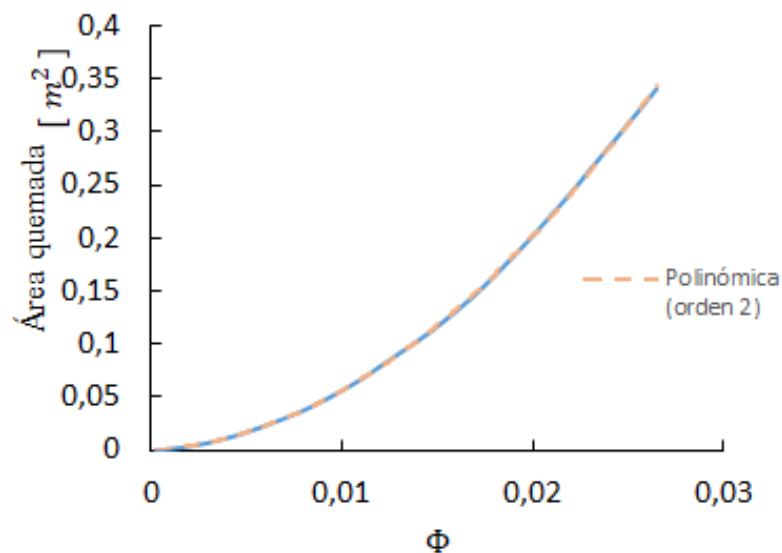


Figura 8.6. Área quemada en función del tiempo para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.



Derivando esta función se obtiene la velocidad de quemado de la cámara. Para conseguir la velocidad de propagación lineal de la llama, se divide la función anteriormente obtenida por el ancho de la celda. Este cálculo presupone que el frente de llama avanza plano.

En la Figura 8.7 se ha dibujado la velocidad de propagación de la llama para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.

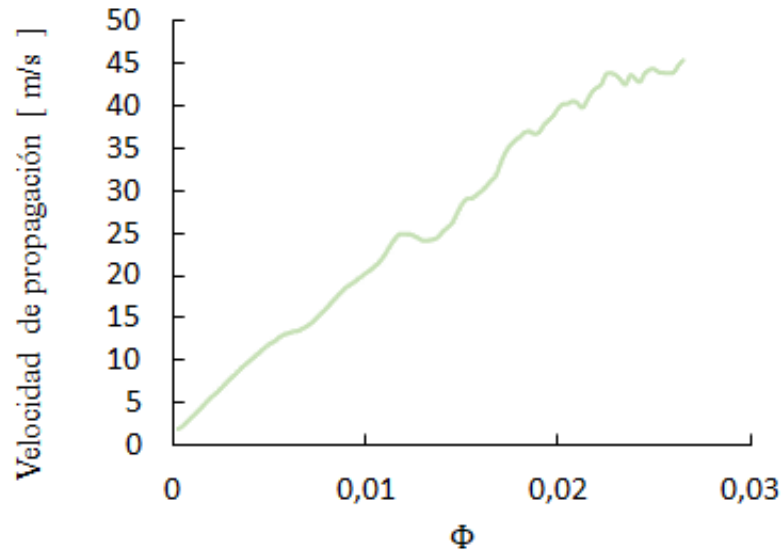


Figura 8.7. Velocidad de propagación de la llama en función del tiempo para la configuración cerrado-abierto y dosado 1.



**PARTE III:**

**ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD  
Y DE LA FORMA DE LAS LLAMAS  
DE PREMEZCLA DE DME**



## 9. RESULTADOS DEL ENSAYO

Se va a detallar los resultados obtenidos en el análisis experimental. En función del estado abierto y/o cerrado de la entrada y de la salida, se tienen tres casos de estudio: cerrado-abierto, abierto-abierto y abierto-cerrado. Cada caso es realizado para diferentes dosados entre 0.7 y 1.4.

Para cada dosado se obtienen las áreas quemadas y la velocidad de propagación de la llama en función del tiempo. Para compararlos se presenta un dosado pobre, el dosado estequiométrico, y un dosado rico de cada configuración. Para cada caso se obtiene una gráfica que relaciona la velocidad de propagación media de la llama en función del dosado. Además, en el caso abierto-cerrado se analiza la frecuencia de oscilación de la velocidad para los diferentes dosados.

Para ilustrar las tres configuraciones de estudio se presenta un esquema isométrico y de la planta, tanto del llenado como del proceso de combustión. Las imágenes que se muestran son fotomontajes en los que se representa el avance de la llama.

### 9.1. Caso cerrado abierto

Durante el llenado la celda permanecerá cerrada por la entrada y abierta por la salida, para facilitar la entrada de la mezcla, como se puede observar en la Figura 9.1.1.

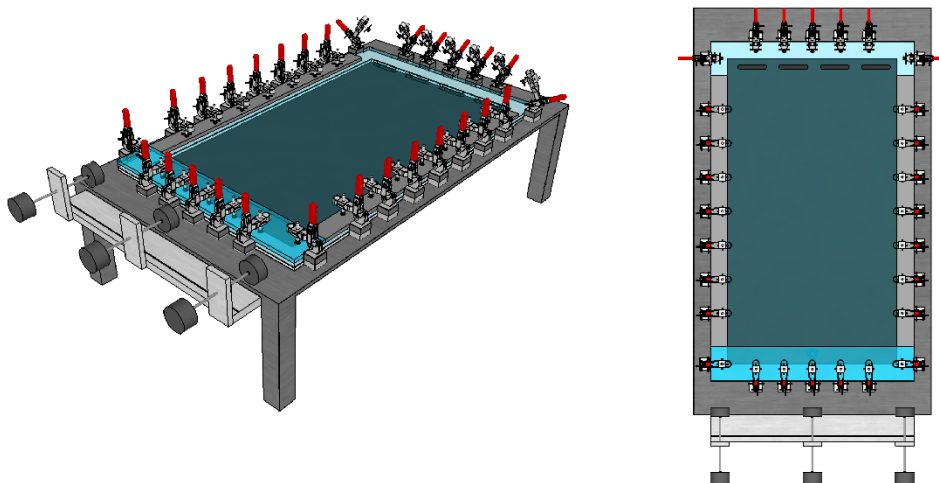


Figura 9.1.1. Llenado de la cámara configuración cerrado-abierto.

En la ignición no se modifica ningún elemento de la celda, tal y como se puede apreciar en la Figura 9.1.2.

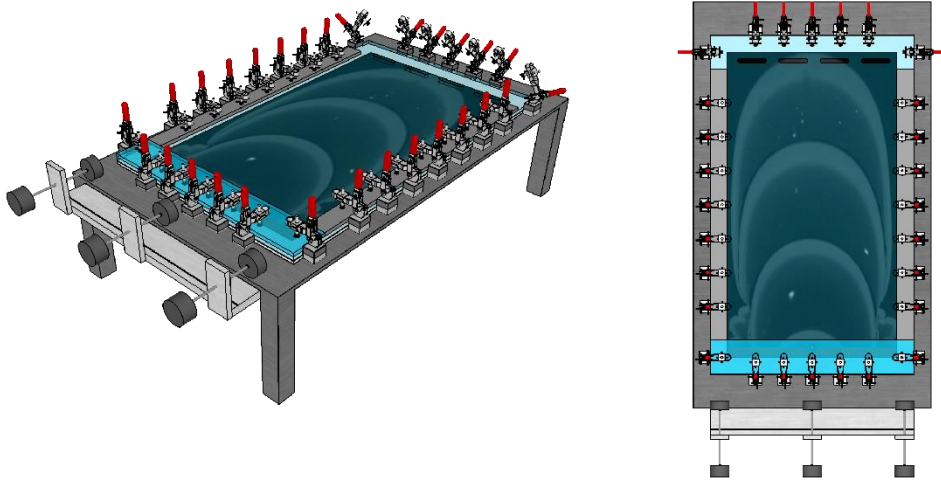


Figura 9.1.2. Ignición de la mezcla para la configuración cerrado-abierto.

En la Figura 9.1.3 se presenta el avance de la llama de izquierda a derecha mediante la superposición de diferentes fotogramas, para los dosados de estudio. De esta manera se va a analizar la forma característica que presenta la llama en esta configuración.

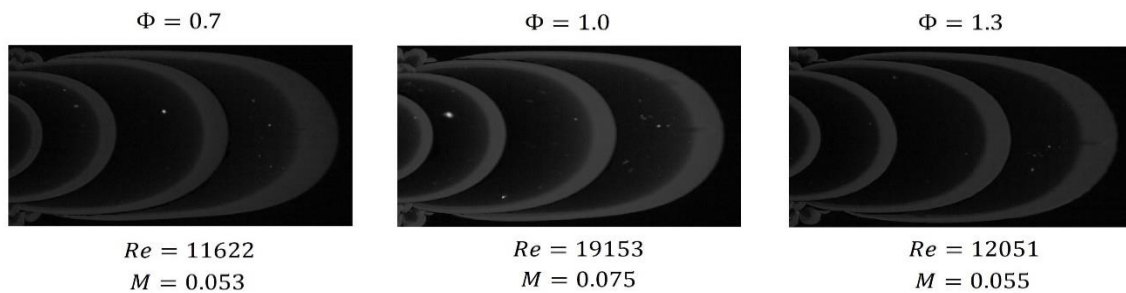


Figura 9.1.3. Forma de la llama de los tres dosados presentados en el caso cerrado-abierto.

Lo primero que se destaca es la forma suave y estructurada que presenta la llama. Este tipo de llama sufrirá el “*efecto pistón*”, como se explica en el apartado 6, el hecho de que los gases quemados no puedan salir de la cámara empujarán la llama acelerándola. Como se comprobará a continuación esta llama es la más rápida. Se observa además que la llama no presenta muchas corrugaciones por lo que principalmente está formada por un lóbulo. Se puede ver la forma característica de “dedo”, esto se puede comparar a los primeros momentos de la conocida “*tulip flame*” [26].

En las Figuras 9.1.4 se presenta el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado pobre de  $\Phi = 0.7$ .

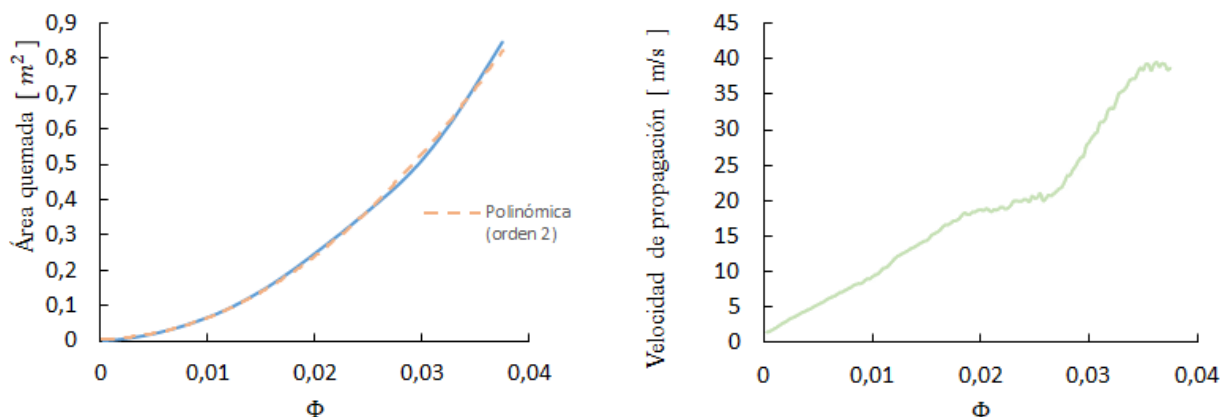


Figura 9.1.4. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre  $\Phi = 0.7$  de la configuración cerrado-abierto.

En la gráfica de la izquierda se puede observar como el área quemada aumenta de forma parabólica con el tiempo. Se quema un 84.6% del total de la celda en 0.0375s.

En la gráfica de la derecha se observa que la velocidad aumenta de forma lineal, en cuatro tramos, esto indica que hay pequeñas variaciones de aceleración a lo largo de la reacción. Alcanza una velocidad máxima de 39.56 m/s, y presenta una velocidad media de 18.15 m/s.

En las Figuras 9.1.5 se muestra el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado estequiométrico de  $\Phi = 1$ .

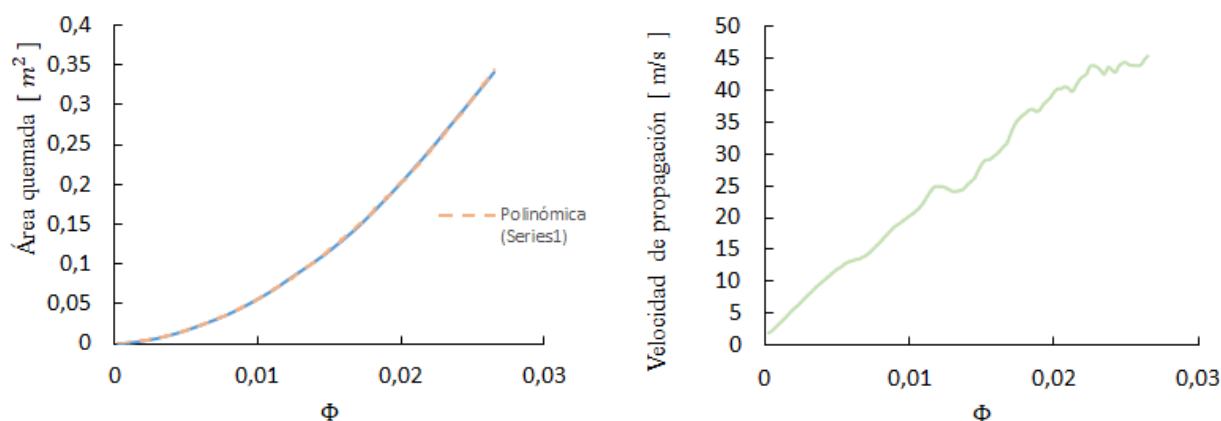


Figura 9.1.5. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico  $\Phi = 1.0$  de la configuración cerrado-abierto.

De nuevo en la gráfica de la izquierda se observa la tendencia parabólica del área quemada en función del tiempo. Se quema un 85.19% del total de la celda en 0,0265s, siendo la llama más rápida que la del caso pobre.

En la gráfica de la derecha se observa que la variación de la velocidad de propagación tiene una tendencia lineal al igual que en el dosado pobre, sin embargo la pendiente de la curva, es decir, su aceleración es más o menos la misma en todo momento. Alcanza una velocidad máxima de 45.43 m/s, y una velocidad media de 25.91 m/s.

En la Figura 9.1.6 se establece el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado rico de  $\Phi = 1.3$ .

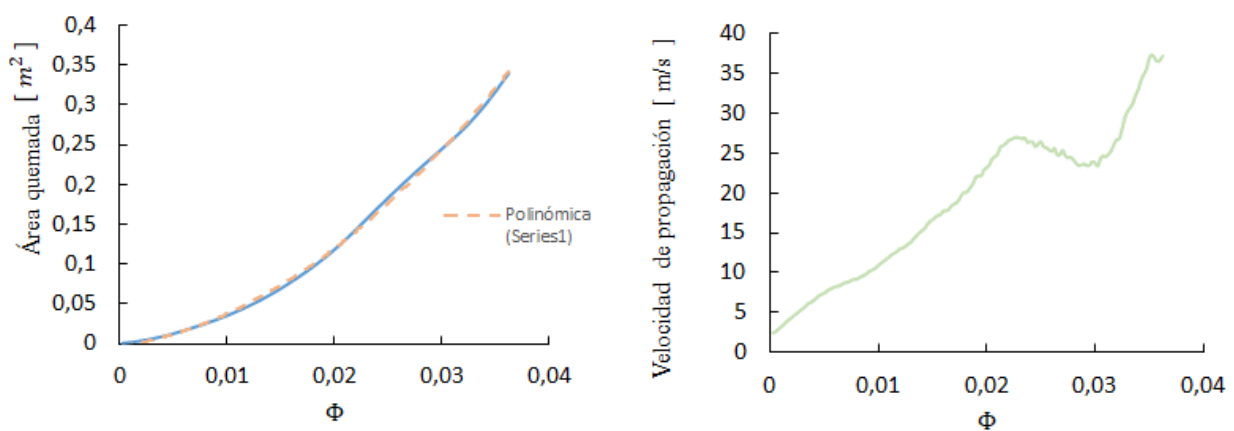


Figura 9.1.6. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico  $\Phi = 1.3$  de la configuración cerrado-abierto.

El caso de mezcla rica presenta una gráfica de área quemada frente al tiempo también parabólica aunque se observa una pequeña curvatura a mitad de la combustión. Se ha quemado un 84.9% del total de la celda en 0,0365s, por lo tanto, es más lenta que la del caso estequiométrico.

En la gráfica derecha existe de nuevo una tendencia lineal en la variación de la velocidad de propagación respecto al tiempo. Sin embargo, queda reflejada la curvatura de la gráfica de la variación de área quemada en función del tiempo, con una deceleración constante a la mitad de la reacción, finalizando con una aceleración de nuevo constante hasta que termina la combustión. Alcanza una velocidad máxima de 37.34 m/s, y una velocidad media de 18.82 m/s.

Repetiendo el análisis para el resto de casos se obtiene la velocidad media de propagación de la llama en función del dosado tal y como aparece reflejado en la Figura 9.1.7.



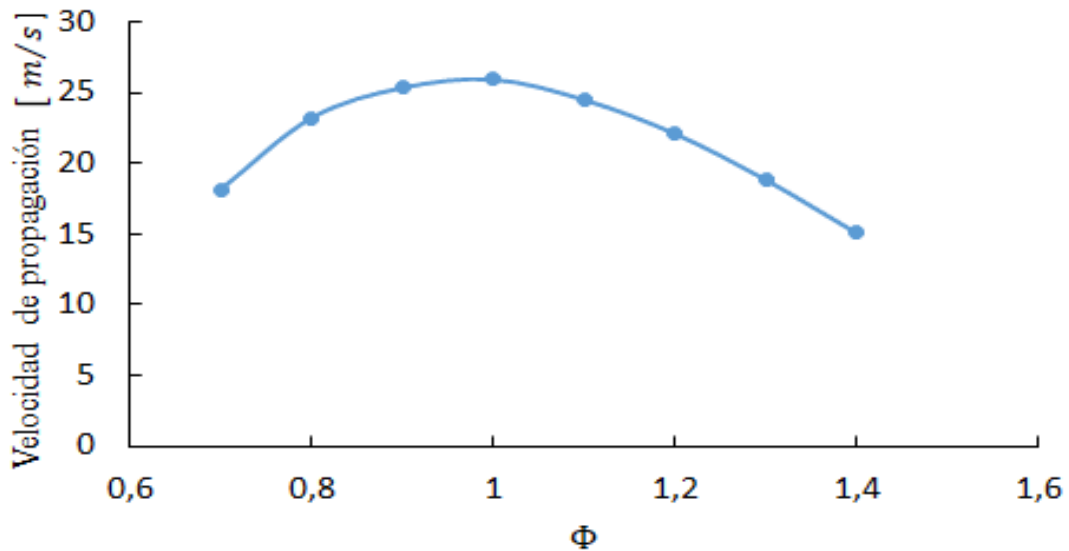


Figura 9.1.7. Velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para la configuración cerrado-abierta.

La velocidad media de propagación tiene un claro máximo entorno al dosado estequiométrico, reduciéndose su velocidad a medida que se empobrece o se enriquece la mezcla. Se comprueba de este modo como a medida que se está más alejado del dosado estequiométrico la llama es más lenta.

## 9.2. Caso abierto-abierto

Para el llenado de la cámara se mantiene cerrada la entrada con el tablón de madera y abierta por la salida para facilitar que la mezcla se distribuya uniformemente por la celda, tal y como se muestra en la Figura 9.2.1.

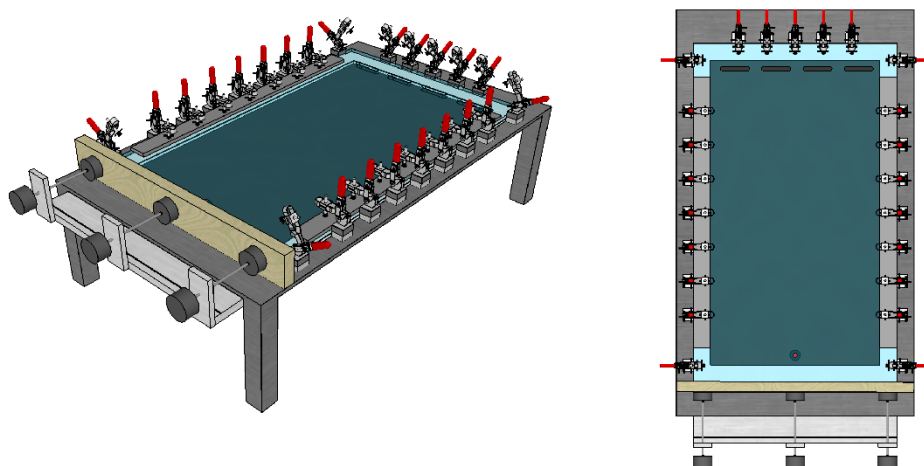


Figura 9.2.1. Llenado de la cámara configuración abierto-abierto.

Para la ignición de la mezcla se abre la entrada, obteniéndose la configuración deseada, como se muestra en la Figura 9.2.2.

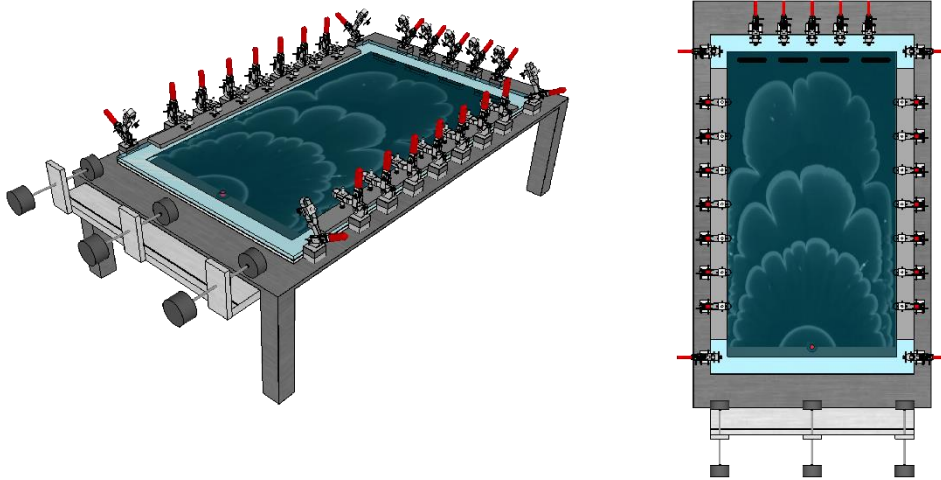


Figura 9.2.2. Ignición de la mezcla para la configuración abierto-abierto.

Se muestra en la Figura 9.2.3 el avance de la llama de izquierda a derecha con el fin de analizar la forma característica de la llama de la configuración abierto-abierto.

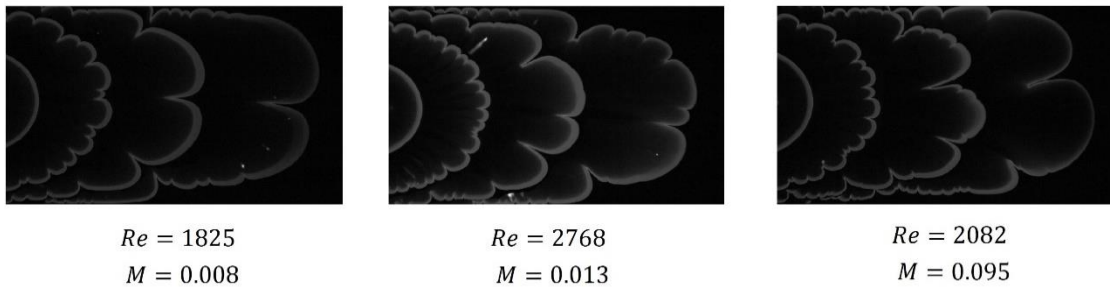


Figura 9.2.3. Forma de la llama de los dosados presentados en el caso abierto-abierto.

El perfil de la llama en esta configuración presenta más corrugaciones, esto se debe a los efectos hidrodinámicos provocados por el gradiente de velocidad presente. Aun así, la forma de la llama continua teniendo un perfil ordenado y estructurado, comprobándose como a medida que avanza la llama las corrugaciones se hacen cada vez más grandes formando lóbulos. Se puede comprobar la renucleación de los dosados más ricos, es decir, en los propios lóbulos formados aparecerán de nuevo corrugaciones.

En las Figuras 9.2.4 se presenta el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado pobre de  $\Phi = 0.7$ .

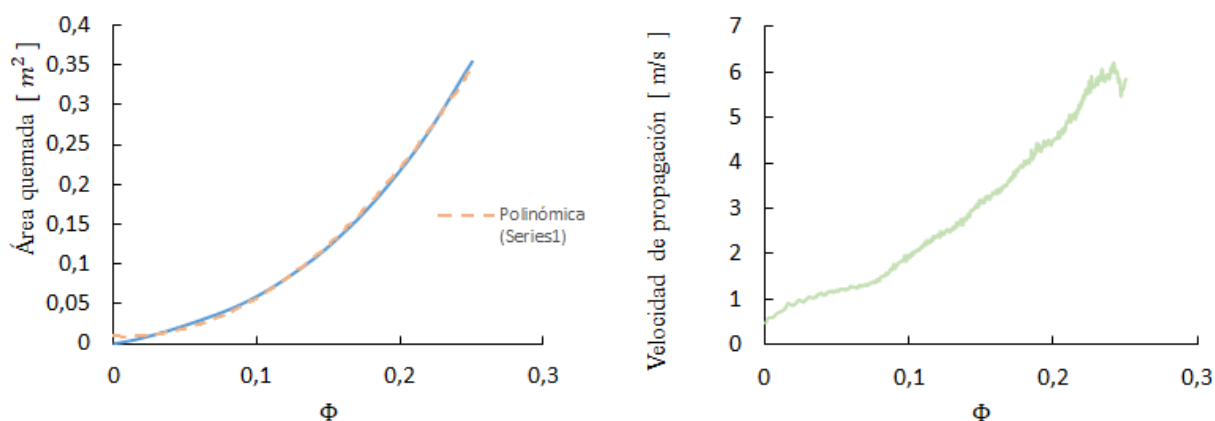


Figura 9.2.4. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre  $\Phi = 0.7$  de la configuración abierto-abierto.

En la gráfica de la izquierda se mantiene el perfil parabólico del área quemada frente al tiempo obtenidos en la anterior configuración. El área quemada de la cámara es de un 88.57% del total de la mezcla produciéndose en 0.2505s, es decir, esta llama es del orden de 10 veces más lenta que su homóloga del caso cerrado-abierto.

Por su parte la gráfica de la derecha presenta una ligera tendencia parabólica lo que representa un incremento constante de la aceleración de la llama. La velocidad de propagación alcanza un máximo de 6.08 m/s, presentando una media de avance de 2.85 m/s.

En las Figuras 9.2.5 se muestra el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado estequiométrico de  $\Phi = 1$ .

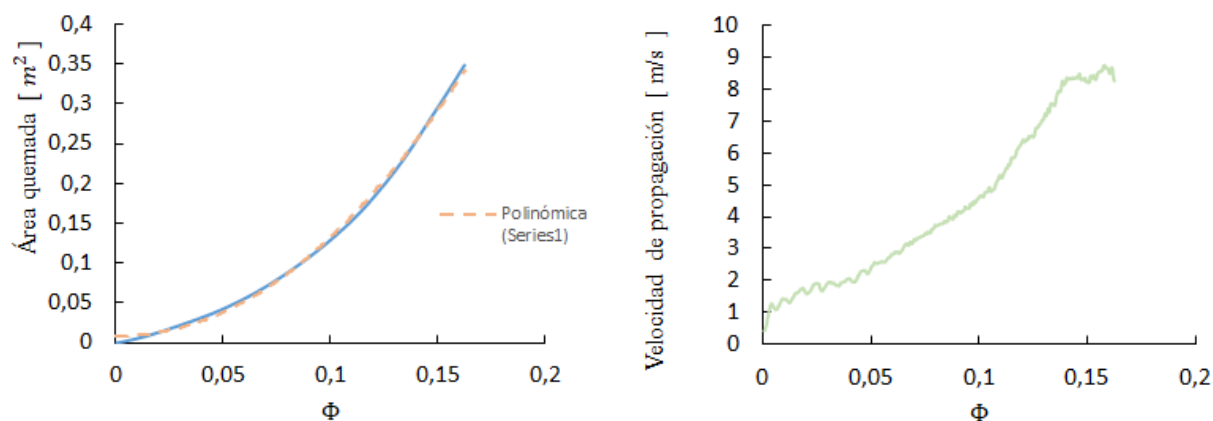


Figura 9.2.5. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico  $\Phi = 1.0$  de la configuración abierto-abierto.

El área quemada respecto del tiempo vuelve a ser parabólica. En este caso el área quemada de la celda es de un 87.13% en 0.165s. Esto refleja que la velocidad de propagación de la cámara aumenta de nuevo para el dosado estequiométrico respecto del dosado pobre.

La variación de la velocidad de propagación frente al tiempo tiene una mayor tendencia parabólica que el dosado pobre. La velocidad máxima de propagación de la llama es de 8.75 m/s, y tiene una velocidad media de 4.32 m/s.

En la Figura 9.2.6 se establece el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado rico de  $\Phi = 1.3$ .

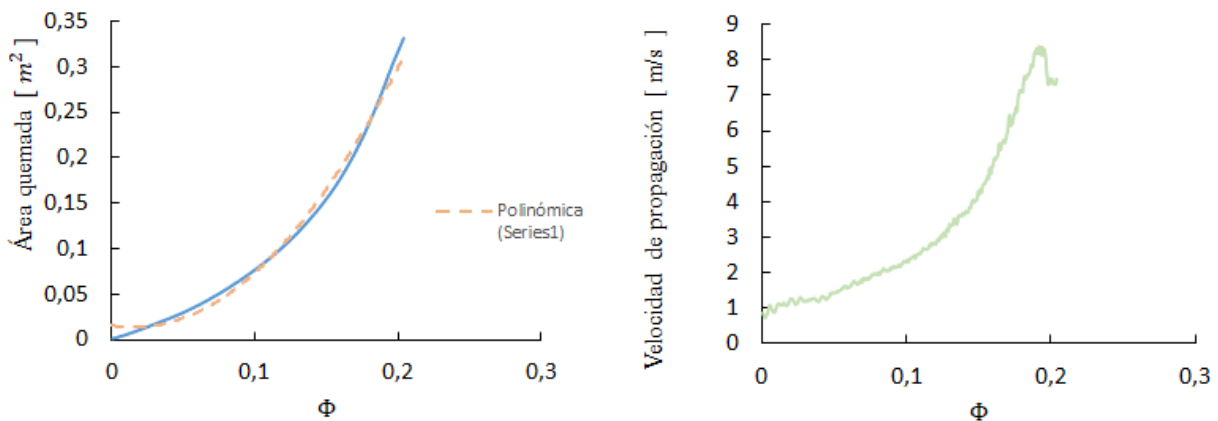


Figura 9.2.6. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico  $\Phi = 1.3$  de la configuración abierto-abierto.

La gráfica del área quemada frente al tiempo es parabólica quemándose un 87.1 % de la celda en 0.204, por lo que, se comprueba de nuevo que la velocidad de propagación se reduce para la mezcla rica, siguiendo la tendencia de la configuración cerrado-abierto.

En la gráfica 9.2.7 se refleja la velocidad media de propagación en función de los dosados.

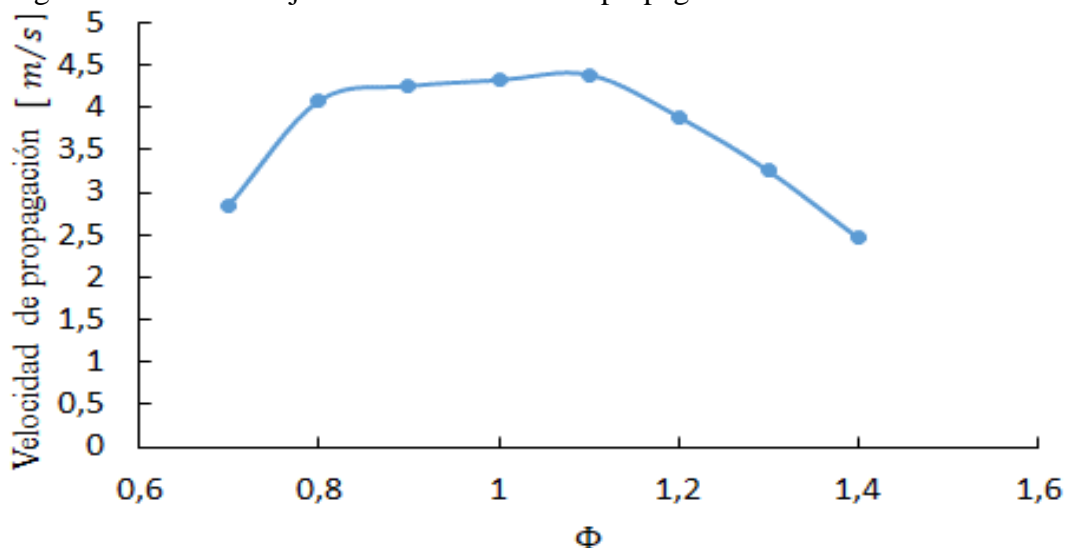


Figura 9.2.7. Velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para la configuración abierto-abierto.

Se observa como la velocidad media de propagación de la llama tiene su máximo en el dosado rico  $\Phi = 1.1$ , reduciéndose su velocidad cuanto más alejado nos encontramos de este dosado, tanto hacia los dosados pobres como ricos.

### 9.3. Caso abierto-cerrado

El llenado de la celda es igual que en el caso abierto-abierto, es decir, se mantiene cerrada la entrada con el tablón de madera y abierta la salida facilitando el llenado de la celda, tal y como se presenta en la Figura 9.3.1.

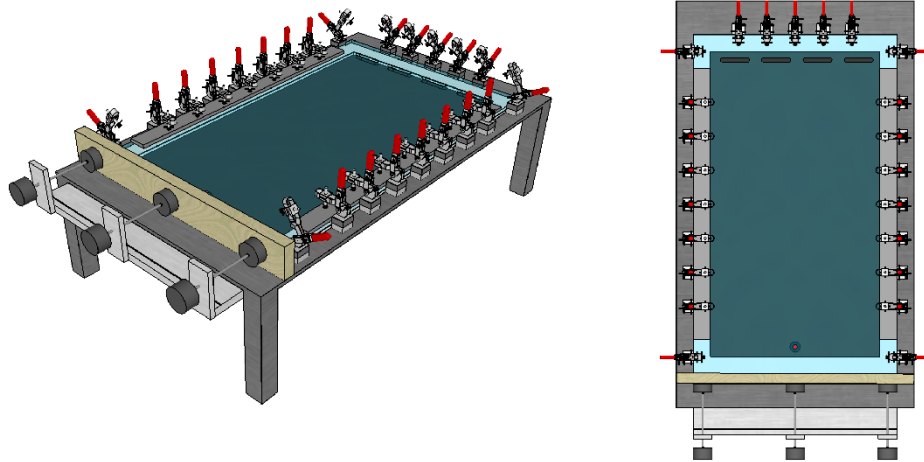


Figura 9.3.1. Llenado de la cámara configuración abierto-cerrado.

Para conseguir la configuración abierto-cerrado, colocamos una tapa de metacrilato a la salida de la cámara como se puede observar en la Figura 9.3.2.

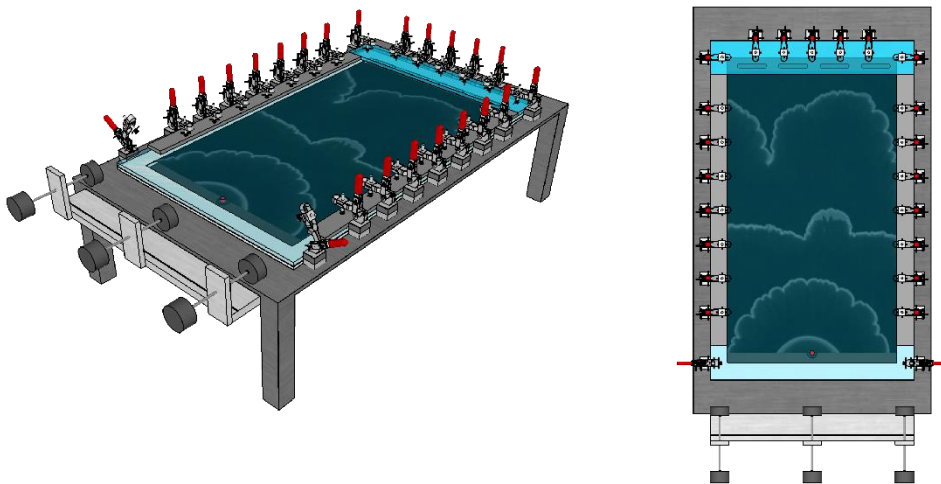


Figura 9.3.2. Ignición de la - mezcla para la configuración abierto-cerrado.

Se muestra en la Figura 9.3.3 el avance de la llama de izquierda a derecha para los diferentes dosados con el fin de analizar la forma característica de la llama de esta configuración

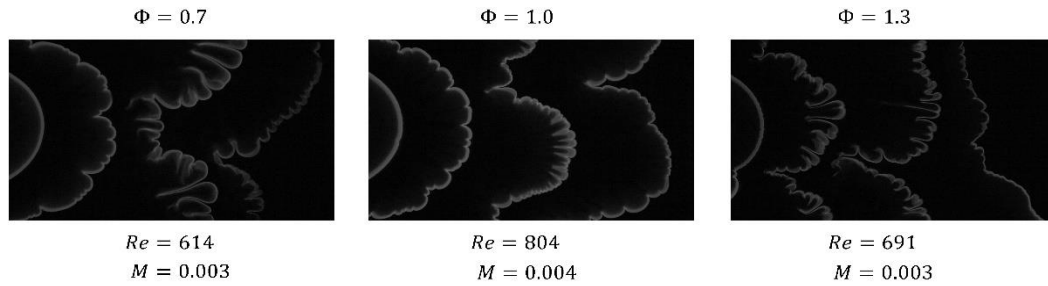


Figura 9.3.3. Forma de la llama de los dosados presentados en el caso abierto-cerrado.

La llama presenta un perfil claramente irregular con una gran cantidad de corrugaciones. Inicialmente se propaga como las otras dos configuraciones, sin embargo, llegado un punto crítico comienza a nuclearse y de repente empieza a oscilar hacia delante y hacia atrás de forma relativamente suave lo que provoca que antes de la mitad de la combustión la llama se aplane. Hacia la mitad de la celda comienza a oscilar más bruscamente apareciendo perfiles en forma de dedo nucleados.

Este fenómeno de oscilación es provocado por dos fenómenos simultáneos, el primero es una inestabilidad termoacústica la cual al alcanzar la llama una determinada velocidad provoca una onda sonora que se acopla con el avance de la llama modificando su velocidad debido a cambios locales de presión y por lo tanto acelerándola. Por el otro lado, el confinamiento de los gases de la mezcla fresca entre la llama y la salida, provoca que los gases ejerzan una fuerza sobre la llama acelerándola en sentido opuesto.

En las Figuras 9.3.4 se presentan el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado pobre de  $\Phi = 0.7$ .

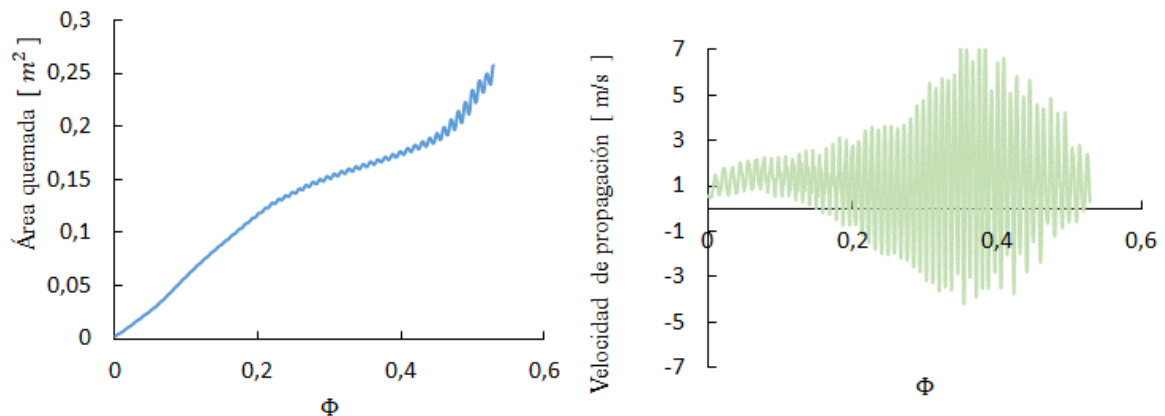
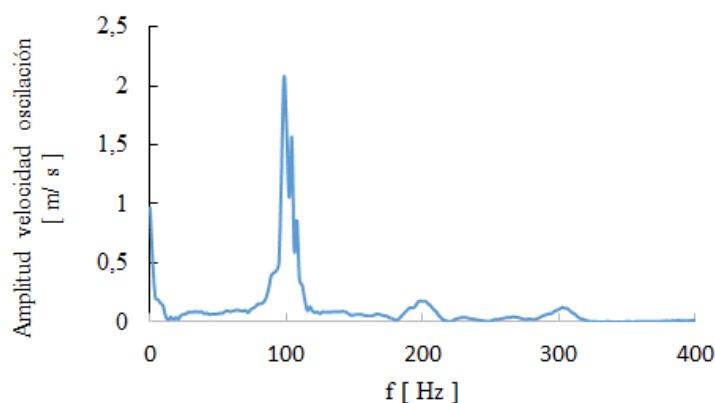


Figura 9.3.4. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado pobre  $\Phi = 0.7$  de la configuración abierto-cerrado.

En la gráfica de la izquierda se observa claramente como el área quemada no tiene una tendencia muy definida, presentando oscilaciones en su avance, lo que se traduce en velocidades positivas y negativas alternantes, es decir, la llama se mueve hacia adelante y hacia atrás constantemente, aun así la llama avanza hacia adelante en términos absolutos, quemando un 64.3% en 0.529s. Por lo tanto, este caso es el más lento de las configuraciones de estudio.

La grafica de la velocidad de propagación frente al tiempo muestra como la llama se acelera y se decelera constantemente, presentando una velocidad máxima de propagación de 16.16/s y una velocidad mínima de -8.29m/s, . La velocidad media de propagación es 0.959 m/s. Para analizar en profundidad estas oscilaciones de la velocidad se va a realizar un análisis espectral de la señal mediante la transformada rápida de Fourier (FTT), lo que nos permite conocer las frecuencias predominantes a las que oscila la llama

En la Figura 9.3.5 se presenta el estudio FFT de la velocidad en función del tiempo.



*Figura 9.3.5. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 0.7*

Se comprueba que la frecuencia que más relevancia tiene en la oscilación de la llama es 98.29 Hz. Se repetirá este análisis para el resto de los casos con el fin de determinar una gráfica en función del dosado que caracterice la frecuencia de oscilación.

En las Figuras 9.3.6 se muestran el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado estequiométrico de  $\Phi = 1$ .

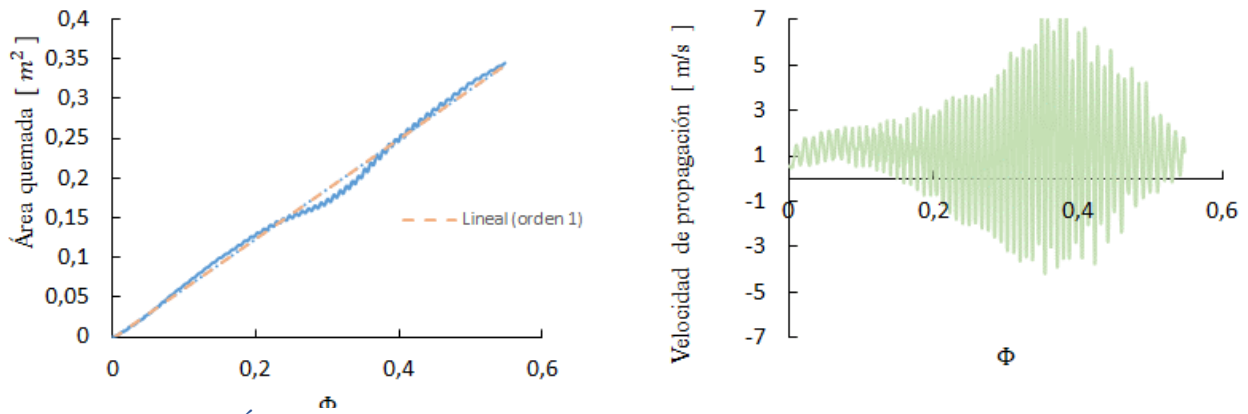


Figura 9.3.6. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado estequiométrico  $\Phi = 1.0$  de la configuración abierto-cerrado.

La gráfica del área quemada vuelve a presentar oscilaciones a lo largo del tiempo lo que se traduce de nuevo en un avance de la llama con velocidades positivas y negativas. En este caso se quema un 86.17% de la mezcla en 0.5480s. De nuevo la llama estequiométrica es más rápida que los dosados pobres.

En la gráfica de la velocidad de propagación se comprueba de nuevo las oscilaciones que presenta la velocidad siendo la velocidad máxima 7.39m/s y la mínima -4.19 m/s. La velocidad media de propagación es 1.26 m/s.

De nuevo realizamos un análisis FFT de la velocidad, como se refleja en la Figura 9.3.7.

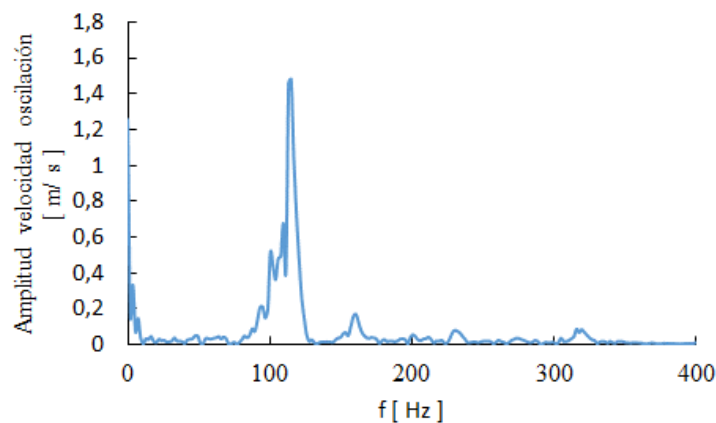


Figura 9.3.7. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 1

La frecuencia con mayor importancia del espectro es 113.13 Hz, por lo que la llama oscilará en mayor medida con esta frecuencia angular.



En las Figuras 9.3.8 se muestran el área quemada de la celda y la velocidad de propagación de la llama para el dosado estequiométrico de  $\Phi = 1$ .

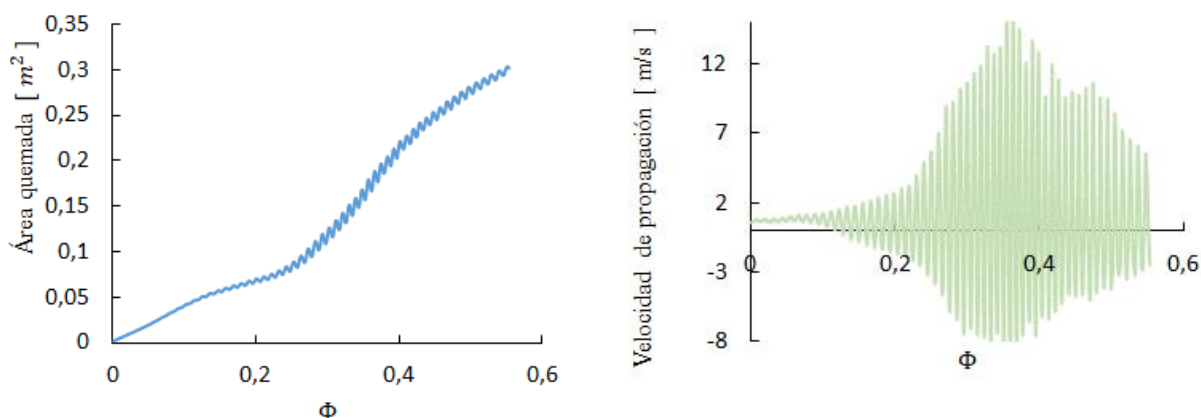


Figura 9.3.8. Área quemada y velocidad de propagación en función del tiempo para el dosado rico  $\Phi = 1.3$  de la configuración abierto-cerrado.

De nuevo en la gráfica del área quemada en función del tiempo aparecen oscilaciones por lo que el frente de llama avanza y retrocede durante el transcurso del ensayo. El área quemada es 75.35% y ocurre en un tiempo 0.540s. De nuevo se comprueba que la velocidad de quemado de la llama es más lenta en el dosado rico al igual que en las otras dos configuraciones.

Por su parte el gráfico de la velocidad de propagación vuelve a presentar oscilaciones por lo que la llama se acelera y decelera durante toda la combustión alcanzando una velocidad máxima de 15.34m/s y una velocidad mínima de -8.71m/s. En términos medios, la llama tiene una velocidad de propagación de 1.079m/s.

Se presenta en la Figura 9.3.9 en análisis FFT.

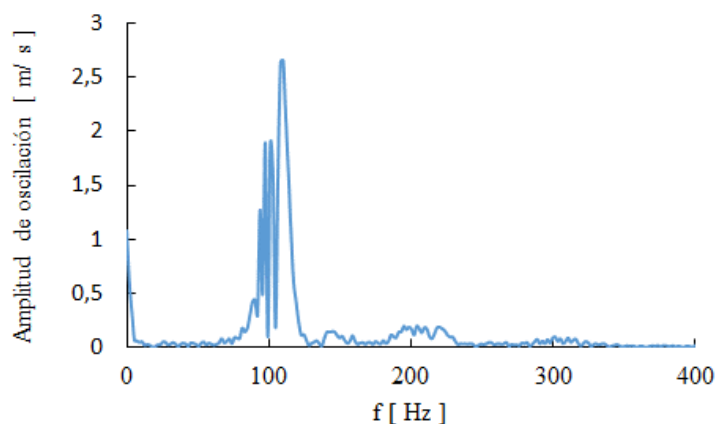


Figura 9.3.9. Análisis FFT configuración cerrado-abierto dosado 1.3

La frecuencia de oscilación más importante en la oscilación es 110.1 Hz

A continuación se presenta en la Figura 3.3.10 la gráfica de la velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para el caso abierto-cerrado.

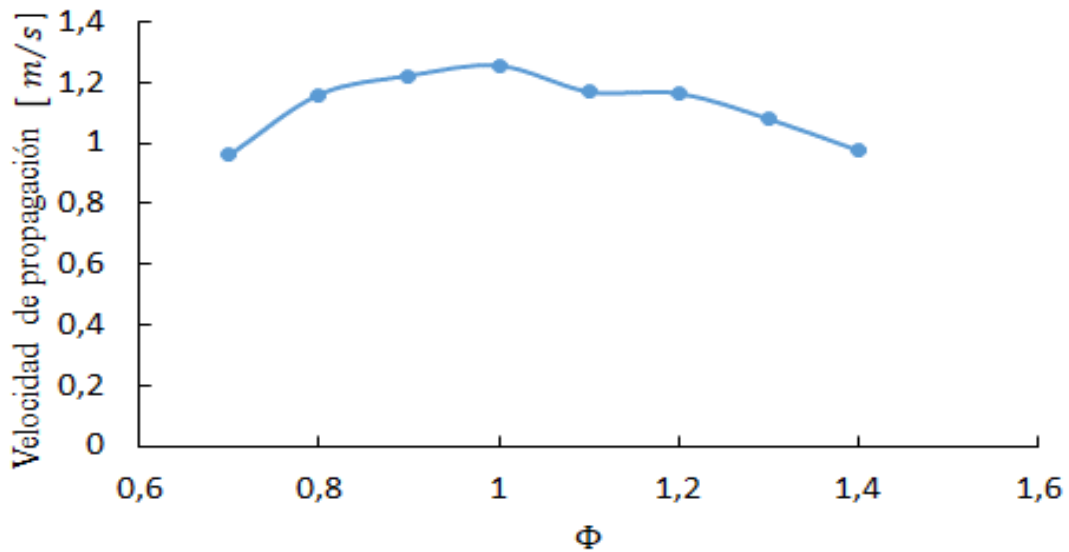


Figura 9.3.10. Velocidad media de propagación de la llama en función del dosado para la configuración abierto-abierto.

La gráfica de la velocidad de propagación frente a los diferentes dosados muestra un máximo en el dosado estequiométrico y a medida que nos alejamos de este punto por ambos extremos la llama es más lenta. Por lo tanto, repite el mismo patrón que en los dos casos anteriores.

Se muestra a continuación en la Figura 9.3.11. la gráfica de las frecuencias pico del análisis espectral de Fourier en función del dosado.

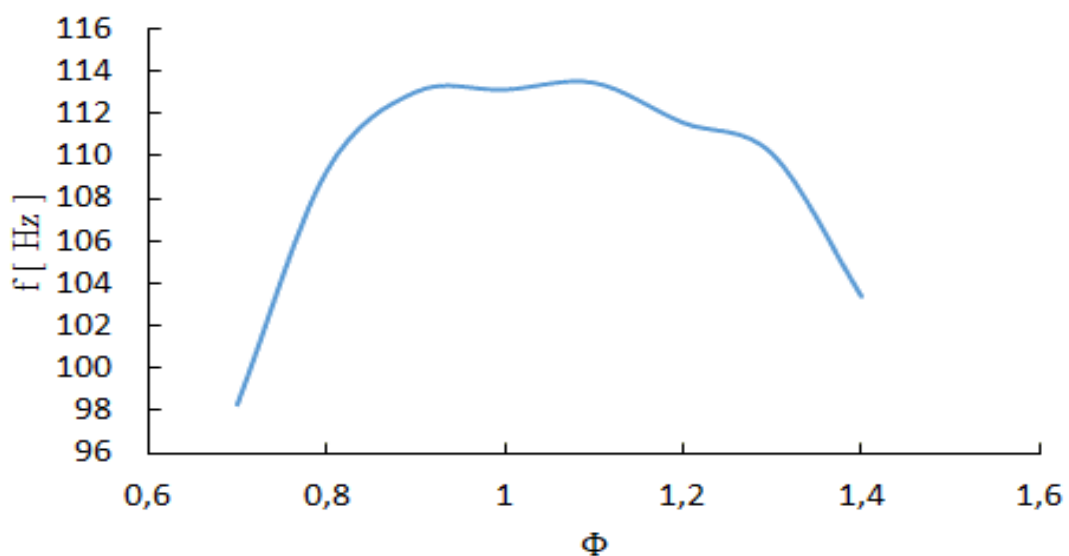


Figura 9.3.11. Frecuencia de oscilación predominante en función del dosado.

Se puede observar que las frecuencias de oscilación tienen un comportamiento muy parecido a las gráficas de velocidad en función del dosado presentando una mayor frecuencia para dosados cercano al estequiométrico.

Al margen del presente estudio se analizó un vídeo con un dosado de 0.5 para el caso abierto-cerrado comprobando que la oscilación desaparece.



## 10. CONCLUSIONES

El estudio experimental presentando, ha conseguido todos sus objetivos iniciales, logrando caracterizar el comportamiento fluido dinámico de las llamas laminares de premezcla dentro de la celda Hele-Shaw para las diferentes condiciones de contorno. Además, ha quedado constatada la gran utilidad del análisis de imagen como método de medición del fenómeno de la combustión.

A continuación se va a proceder a realizar un breve resumen de los datos que se han obtenido. En primer lugar, el análisis químico de la combustión proporciona un conocimiento a nivel molecular de la reacción, permitiendo establecer que el análisis experimental se verá muy influenciado por la gran cantidad de nitrógeno disuelto en el aire.

En segundo lugar el estudio termodinámico permite conocer los intercambios energéticos efectuados en la cámara pudiendo establecer la temperatura adiabática de las llamas de DME, lo cual resulta útil a la hora de diseñar las cámaras de combustión con el fin de escoger materiales resistentes.

Por último el estudio fluido dinámico de las llamas de DME, ha mostrado las claras diferencias que presentan para diferentes configuraciones. Siendo las llamas del caso cerrado-abierto las más rápidas, después las del caso abierto-abierto y por último, las del caso cerrado-abierto.

También cabe destacar que para todas las configuraciones la velocidad será más rápida para los dosados cercanos a la reacción estequiométrica, reduciéndose su velocidad a medida que nos alejamos de este punto



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. A. López, «www.man.es,» Enero 1998. [En línea]. Available: <http://www.man.es/man/dms/man/actividades/pieza-del-mes/historico/1998-de-la-cueva-al-palacio/1-enero/MAN-Pieza-mes-1998-01-Cueva-Altamira.pdf>. [Último acceso: 18 Junio 2018].
- [2] S. Ferrer, «Sinc,» 7 Junio 2013. [En línea]. Available: <https://www.agenciasinc.es/Reportajes/La-quimica-del-fuego-griego-el-secreto-militar-mejor-guardado-de-la-historia>. [Último acceso: 15 Junio 2018].
- [3] O. Villagrán, «cultura colectiva,» 9 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://culturacolectiva.com/historia/12-pensadores-griegos-que-transformaron-la-forma-en-la-que-ves-el-mundo/>. [Último acceso: 12 Junio 2018].
- [4] Á. G. Ureña, «Investigación y ciencia,» 29 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/la-combustin-y-el-oxigeno-10170>. [Último acceso: 13 Abril 2018].
- [5] C. K. Law, «Combustion physics,» de *Combustion physics*, New York, Cambridge university press, 2006, p. Preface.
- [6] E. Salinas Callejas y V. Gasca Quejada, «Los biocombustibles,» Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México DF, 2009.
- [7] Desconocido, «Aerocamaras,» Aerocamaras, Enero 12. [En línea]. Available: <https://aerocamaras.es/aerohybrx-drone-hibrido-de-aerocamaras-que-alcanza-las-cuatro-horas-de-vuelo/>. [Último acceso: 12 Mayo 2018].
- [8] P. D. Ronney, «ronney.usc.edu,» 7 octubre 2005. [En línea]. Available: <http://slideplayer.com/slide/4922123/>. [Último acceso: 24 Febrero 2018].
- [9] J. M. Selman, «Aplicaciones clínicas del procesamiento digital de imágenes médicas,» 2004.
- [10] J. L. D. Caballero, «astrosurf,» 18 Septiembre 2002. [En línea]. Available: [http://www.astrosurf.com/aagc/observatorio\\_astronomico\\_aagc/articulos/procesado\\_ccd.pdf](http://www.astrosurf.com/aagc/observatorio_astronomico_aagc/articulos/procesado_ccd.pdf). [Último acceso: 7 Marzo 2018].
- [11] K. K. Kuo, «Review of Chemical Thermodynamics,» de *Principles of Combustion*, New York, John Wiley & Sons, Inc, 1986, p. 13.
- [12] R. A. V. Zeebroeck, «El dimetil éter (DME) como nuevo combustible diesel limpio,» *researchgate*, vol. Petroquímica, pp. 98-104, 2002.
- [13] C. K. Law, «Chemical Thermodynamics,» de *Combustion Physics*, Cambridge, Cambridge university press, 2006, p. 15.

- [14] s. Shmarev, «mat.ucm,» [En línea]. Available:  
<http://www.mat.ucm.es/imi/documents/20062007Shmarev.pdf>. [Último acceso: 25 Abril 2018].
- [15] G. M. Barbany, «Thermochenistry,» de *Aerothermochemistry*, Madrid, Asociación de Ingenieros Aeronáuticos De España, 2009, p. 12.
- [16] G. M. Barbany, «Thermochemistry,» de *Aerothermochemistry*, Madrid, Asociación de Ingenieros Aeronáuticos de España, 2006, p. 13.
- [17] G. M. Barbany, «Thermochemistry,» de *Aerothermochemistry*, Madrid, Asociación de Ingenieros Aeronáuticos de España, 2006, p. 14.
- [18] K. K.Kuo, «Review of Chhemical Thermodynamics,» de *Principles of combustion* , New York, John Wiley & Sons, 1986, pp. 65-71.
- [19] G. d. M. d. F. U. C. I. d. Madrid, «Ecuaciones de conservación en forma diferencia,» de *Mecánica de Fluidos*, Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, 2014, p. 33.
- [20] V. Ramirez, «scribd.com,» [En línea]. Available:  
<https://es.scribd.com/document/247906732/ley-de-fick-pdf>. [Último acceso: 13 Marzo 2018].
- [21] G. d. M. d. F. U. C. I. d. Madrid, «Ecuaciones de conservación en forma diferencial,» de *Mecánica de Fluidos*, Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, 2014, p. 26.
- [22] C. K.Law, «Transport Phenomena,» de *Combustion physics*, New York, Cambridge University Press, 2006, pp. 145-146.
- [23] T. Poinso y D. Veynante, «Conservation equations for reacting flows,» de *Theoretical and Numerical Combustion*, Philadelphia, Edward,Inc, 2001, pp. 1-24.
- [24] T. Poinso y D. Veynante, «Laminar premixed flames,» de *Theoretical and Numerical Combustion*, Philadelphia, Edwards, Inc, 2001, pp. 27-70.
- [25] P. Clavin y G. Searby, *Combustion Waves and Fronts in Flows*, Marseille, 2016.
- [26] C. Clanet y G. Searby, *Combustion and Flame*, Elseiver, 1996.



## ANEXO A. CÓDIGO MÁTLAB

```
clc; clear;

video_entrada = VideoReader('cerr_abier_dosado1.0.mp4');
whos video_entrada
get(video_entrada);
N = video_entrada.NumberOfFrames;
M = video_entrada.Duration;
O = video_entrada.FrameRate;
P = 4000;
Q = N/P;
t_frame = 1/P;
vidWidth = video_entrada.Width;
vidHeight = video_entrada.Height;
L=0.8;
W=0.5;
l=0.8/vidWidth;
w=0.5/vidHeight;
fact_conversion=l*w;
area=zeros(vidHeight,vidWidth);
area_total_pixeles=vidHeight*vidWidth;
area_total_real= L*W;
pto_X=vidWidth;
se1 = strel('line',50,45);
se2 = strel('disk',15);
for i= 1:N

    imagen = read(video_entrada,i);

    bw= im2bw(imagen);
    pto=1;

    for m = 1:vidWidth
        for n= 1: vidHeight

            if (pto==1) && (bw(n,m)==1)

                pto_X=m;
                pto_Y=n;
                pto=0;

            end
        end
    end

    bw2= imclose(bw,se1);
    bw2= imclose(bw2,se2);
    bw2=bwperim(bw2,8);

    for n=1:vidHeight

        bw2(n,1)=0;
        bw2(n,vidWidth-1)=0;
        bw2(n,vidWidth)=0;

    end

    for m=1:vidWidth
        bw2(1,m)=0;
        bw2(2,m)=0;
        bw2(vidHeight-1,m)=0;
        bw2(vidHeight,m)=0;
    end

    boundary = bwtraceboundary(bw2,[pto_Y pto_X],'W');
    [z,t]=size(boundary);
```

```

x=boundary(:,1);
y1=vidWidth*ones(z,1);
y=y1-boundary(:,2);
C=[x y];
[k,idx]=sort(C(:,1));
C=C(idx,:);
X=C(:,1);
Y=C(:,2);
B=trapz(X,Y,1);
area_pixel(i)=B/area_total_pixeles;
area_real(i)=B*(fact_conversion);
funcion_pixeles=[((1:i)*t_frame)' area_pixel'];
funcion_real=[((1:i)*t_frame)' area_real'];
Fx_pixeles=funcion_pixeles(:,1);
Fy_pixeles=funcion_pixeles(:,2);
Fx_real=funcion_real(:,1);
Fy_real=funcion_real(:,2);
Fyp1_pixeles = polyfit(Fx_pixeles,Fy_pixeles,7);
yp1_pixeles = polyval(Fyp1_pixeles,Fx_pixeles);
Fyp1_real = polyfit(Fx_real,Fy_real,7);
yp1_real = polyval(Fyp1_real,Fx_pixeles);

[z,t]=size(boundary);

matriz=zeros(vidHeight,vidWidth);

    for l = 1:z

        p=boundary(l,1);
        q=boundary (l,2);

        matriz (p,q)=1;

    end

imshow(matriz);

display(i);
end

subplot(1,5,1), plot(Fx_real,Fy_real,'ro');
ylabel('Area quemada [m2]'), xlabel('tiempo(s)');
hold on
plot(Fx_real,yp1_real,'b','linewidth',2);
hold off

V1=gradient(Fy_real, Fx_real);
subplot(1,5,2), plot(Fx_real,V1,'b','linewidth',2);
ylabel('Velocidad area quemada real [m2/s]'), xlabel('tiempo(s)');

V2=V1/0.5;
subplot(1,5,3), plot(Fx_real,V2,'b','linewidth',2);
ylabel('Velocidad lineal llama real [m/s]'), xlabel('tiempo(s)');

V3=gradient(yp1_real, Fx_real);
subplot(1,5,4), plot(Fx_real,V3,'b','linewidth',2);
ylabel('Velocidad area quemada ajustada [m2/s]'), xlabel('tiempo(s)');

V4=V3/0.5;
subplot(1,5,5), plot(Fx_real,V4,'b','linewidth',2);
ylabel('Velocidad lineal llama ajustada [m/s]'), xlabel('tiempo(s)');

```